



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**POKLES MEZE PEVNOSTI PŘI SVAŘOVÁNÍ
HLINÍKOVÝCH SLITIN AW 6060**

LOSS OF STRENGTH DURING WELDING ALUMINOUS ALLOYS AW 6060

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Martin Sklenář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Marián Sigmund, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Martin Sklenář**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Marián Sigmund, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Pokles meze pevnosti při svařování hliníkových slitin AW 6060

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zabránění poklesu meze pevnosti při svařování Al slitiny AW 6060. Popis problematiky poklesu meze pevnosti u Al slitin obecně. Výběr vhodné metody svařování, včetně návrhu kvalifikace daného postupu svařování podle EN ISO 15614–2.

Cíle bakalářské práce:

1. Zhodnotit současný stav problematiky poklesu meze pevnosti u hliníkových slitin.
2. Vypracovat literární rešerši výběru vhodné metody svařování.
3. Vyhodnotit parametry a podmínky svařování v závislosti na možných mechanických zkouškách svarového spoje.
4. Navrhnout ideální podmínky pro certifikaci postupu svařování.
5. Vytvořit postup svařování podle EN ISO 15614–2.

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan. Technologie II. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2683-7.

PILOUS, Václav. Materiály a jejich chování při svařování, 1. vyd. ŠKODA-WELDING, Pízeň, 2009.

FOLDYNA, Václav. Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 2., upr. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-85-3.

AMBROŽ, Oldřich. Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.

MAJER, Lubomír. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-85771-70-5.

BARTÁK, Jiří. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. Ostrava: ZEROSS, 2000. ISBN 80-85771-72-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

SKLENÁŘ Martin: Pokles meze pevnosti při svařování hliníkových slitin AW 6060.

Cílem bakalářské práce je kvalifikovat postup svařování dle normy ČSN EN ISO 15614-2. Na úvod práce je představena firma s jejíž spoluprací bakalářská práce vznikla. Poté následuje zhodnocení problematiky ohledně hliníku. Dále je pojednáno o mechanických vlastnostech se zaměřením na hliník. Následuje problematika svařování s důrazem na svařování hliníku. V praktické části byly svařeny vzorky a následně vyhodnoceny, poté pak proběhl návrh a kvalifikace postupu svařování. Na závěr jsou shrnuty možnosti a výsledky, kterých bylo dosaženo.

Klíčová slova: Svařování, MIG, TIG, hliník, hliníkové slitiny, mez pevnosti,

ABSTRACT

SKLENÁŘ Martin: Loss of strength during welding aluminous alloys AW 6060.

The aim of the bachelor thesis is to qualify the welding procedure according to the standard ČSN EN ISO 15614-2. At the beginning of the work is introduced a company with which was this thesis made. This is followed by an assessment of the issue of aluminum. Furthermore, the mechanical properties of aluminum are discussed. Follows by part about welding specially about aluminium welding. In the practical part the samples were welded and subsequently evaluated, then the design and qualification of the welding process was made. In conclusion, the possibilities and results that have been achieved are summarized.

Keywords: Welding, GMAW, GTAW, Aluminium, Aluminium alloys, ultimate strength,

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SKLENÁŘ, Martin. *Pokles meze pevnosti při svařování hliníkových slitin AW 6060*. Brno, 2019. 47 s., 4 přílohy, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Marián Sigmund Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V Brně dne 24.5. 2019

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Panu Ing. Mariánu Sigmundovi Ph.D. za cenné připomínky a rady při zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat firmě IFE a Panu Ing. Martinu Janíkovi za možnost pracovat na tak zajímavém projektu a za poskytnuté konzultace. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat rodině za neúnavnou podporu v dobách dobrých i zlých.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

ÚVOD	11
1 FIRMA IFE-CR, A.S.	12
1.1 Produkty firmy IFE – CR	12
1.1.1 Hromadná přeprava	12
1.1.2 Dálková přeprava	13
1.1.3 Nástupní pomůcky	13
2 HLINÍK A HLINÍKOVÉ SLITINY	14
2.1 Historie hliníku	14
2.2 Výroba hliníku	14
2.3 Vlastnosti hliníku	15
2.4 Slitiny hliníku	15
2.4.1 Série 6000	15
3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI	17
3.1 Zjištění základních materiálových vlastností pomocí zkoušky tahem	17
3.1.1 Znázornění chování různých materiálů v Hookovkém prostoru	19
3.2 Mechanické vlastnosti za zvýšených teplot	19
3.3 Testování svarových spojů dle normy EN ISO 15614-2	21
4 SVAŘOVÁNÍ HLINÍKU A HLINÍKOVÝCH SLITIN	25
4.1 Svařování v ochranné atmosféře inertního plynu tavící se elektrodou – Metoda 131	25
4.1.1 Zdroje pro svařování metodou 131	26
4.1.2 Podavače drátu	26
4.1.3 Svařovací hořáky	26
4.2 Svařování v ochranné atmosféře inertního plynu netavící se elektrodou - Metoda 141	27
4.2.1 Svařování střídavým proudem	28
4.2.2 Hořáky pro svařování metodou 141	28
4.2.3 Wolframové elektrody	29
4.3 Ochranné inertní plyny	29
4.3.1 Argon	29
4.3.2 Hélium	30
4.3.3 Směsi Argonu a Hélia	30
4.4 Přídavné materiály	30
4.4.1 Přídavné materiály pro metodu 131	30
4.4.2 Přídavné materiály pro metodu 141	30

4.5	Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou – metoda 111	31
4.5.1	Svařovací zdroje pro metodu 111	31
4.5.2	Elektrody pro svařování metodou 111	32
4.6	O odporové svařování – metoda 2	32
4.6.1	Parametry odporového svařování	32
4.6.2	Elektrody pro odporové svařování	33
4.7	Svařování třením – FSW	33
4.8	Metody svařování hliníku a jeho slitin používané ve firmě IFE, a.s.	33
4.9	Problémy při svařování hliníku	34
5	PARAMETRY A PODMÍNKY SVAŘOVÁNÍ VZORKU	35
5.1	Svařované materiály	35
5.2	Parametry svařování	37
5.3	Přídavné materiály	38
5.4	Zkoušení vzorků a porovnání výsledků	40
5.5	Výsledky tahové zkoušky po stárnutí	44
5.6	Vyhodnocení zkoušek	44
6	KVALIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ VZORKU	45
6.1	Požadavky normy EN ISO 15613	45
6.1.1	Zkoušení dle normy EN ISO 15613	45
6.1.2	Zásady kvalifikace	45
6.2	Kvalifikovaný postup svařování pro EN AW 6060 dle ČSN EN ISO 15613	45
	ZÁVĚR	47

Seznam použité literatury

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

ÚVOD

Bakalářské práce popisuje současný stav svařování hliníkových slitin a s tím související pokles meze pevnosti při svařování hliníku. Svařování hliníku a hliníkových slitin je specifický obor, při kterém se musí dodržovat určitá pravidla. O těchto pravidlech bude pojednáno dále. Při samotném svařování dochází k tepelnému ovlivnění malých oblastí v okolí svaru a tudíž i změně mechanických vlastností ovlivněných oblastí jako je mez pevnosti. V práci jsou popsány vhodné metody pro svařování hliníku, z důvodu specifických vlastností hliníku jsou nutné i specifické metody. Práce je realizována ve spolupráci s firmou IFE-CR, a.s., sídlící v Brně Modřicích. Ve spolupráci s firmou IFE byl proveden experiment, jež je popsán v druhé části práce. Experiment spočíval ve svaření vzorku, následném provedení předepsaných zkoušek dle normy ČSN EN ISO 15614-2. Dále jsou v práci vyhodnoceny tyto zkoušky a provedeno doporučení k dalšímu vývoji tohoto projektu.

1 FIRMA IFE-CR, A.S. [1], [2], [3]

Společnost IFE byla založena v roce 1947 ve Vídni pod názvem "Institut für Technische Forschung und Entwicklung". Zpočátku se specializovala na výrobu a vývoj specifických zařízení pro rakouský průmysl. Postupně v pozdějších letech se firma přeorientovala na výrobu a konstrukci dveřních systémů pro různá kolejová vozidla. V současné době je společnost IFE světovou špičkou ve výrobě široké škály dveřních systémů pro kolejová vozidla a nástupní příslušenství (schody, rampy a další). Firma IFE má pobočky v USA, Brazílii, Austrálii, Indii, Číně, Japonsku, Jižní Korei, Nizozemí, Španělsku a České republice. Česká pobočka firmy vznikla v roce 1996 z firmy Hády – Metall jako IFE-CR, a.s. (dále jen IFE-CR). Od roku 1997 patří firma pod německý koncern Knorr-Bremse GmbH (dále jen Knorr-Bremse). Knorr-Bremse je koncern sídlící v Mnichově, v Německu a specializující se na výrobu brzdících systémů železničních vozidel. Od roku 2001 je IFE-CR hlavním výrobcem dveřních systémů v Evropě. V současné době pobočka v Brně – Modřicích zaměstnává 860 lidí a s obratem 3,4 mld. Kč patří mezi největší firmy v regionu.



Obr. 1 Sídlo společnosti v rakouském Kematenu [2]

1.1 Produkty firmy IFE – CR [3]

Jak už bylo řečeno firma IFE se specializuje na výrobu dveří, dveřních systémů a nástupního příslušenství. Mezi toto patří samotné dveře ale i dveřní pohony a také nástupní rampy, schody a můstky. Tyto produkty se dají pro lepší porozumění rozdělit do tří základních skupin.

1.1.1 Hromadná přeprava

A. Posuvné dveře

Princip posuvných dveří spočívá v tom, že se otvírají směrem od sebe podél vozidla, buďto vně nebo uvnitř. Pohony těchto dveří jsou hlavně elektrické. Toto provedení dveří se používá především pro metra. Výhoda tohoto systému je rychlost reakce při otvírání a zavírání.

B. Předsuvné dveře

Při otvírání se tento typ dveří napřed vysune z vozidla a následně posouvá do stran. Po zavření jsou obě křídla dveří ve stejné rovině jako povrch vozidla. Tento typ dveří se používá hlavně pro tramvaje a příměstské vlaky. Výhodou je možnost vybavení speciálním tlakotěsným těsněním odolné vůči extrémním teplotám.

C. Vnitřní dveře a dveře mezi vozy

Mezi tento typ dveří náleží všechny dveře uvnitř kolejových vozidel např. dveře kabiny řidiče a dveře mezi oddíly. Základní požadavek na tento typ je aby se dveře snadno pohybovaly a jejich pořizovací cena byla co možná nejnižší.

1.1.2 Dálková přeprava

A. Předsuvné dveře pro dálkovou dopravu

Tento typ se používá především v jednokřídlé verzi u rychle jedoucích vlaků. Podle účelu tyto dveře mají požadavky na zvukotěsnost a tepelnou izolaci.

B. Předsuvné dveře pro dálkovou dopravu

Tento typ se velmi shoduje s typem pro hromadnou dopravu. Jen je používán pro vysokorychlostní vlaky, z čehož vyplívají speciální požadavky na funkci. Výhodou je, že dveře sami o sobě zajišťují tlakotěsnost bez nutnosti dalšího přídatného systému.

1.1.3 Nástupní pomůcky

Mezi nástupní pomůcky firmy IFE patří systémy pro nástup cestujících i cestujících s postižením nebo cestujících na invalidním vozíku. Rampy pro invalidní vozíky a handicapované se používají zejména ke zmenšení rozdílu mezi podlahou vozu a nástupištěm. Dále mezi produkty firmy IFE najdeme přemostění mezi jednotlivými vagóny. Důležitá u těchto pomůcek je velikost, jednoduchost a spolehlivost.

2 HLINÍK A HLINÍKOVÉ SLITINY [4], [5], [6], [7], [8]

Tato kapitola se věnuje popisu hliníku a jeho slitin. Začátek je věnován historii, výrobě, zpracování a vlastnostem hliníku. Ve střední části jsou popsány slitiny hliníku se zaměřením na slitinu AW 6060. V poslední části je zpracováno využití jak hliníku tak jeho slitin.

2.1 Historie hliníku [4], [5], [6]

Historie hliníku je poměrně krátká. Dán Christian Oersted v první polovině 19. století jako první v laboratoři vyrobil hliník a to chemickou redukcí draslíkem. Jeho produkt byl ovšem velmi drahý a tudíž nevhodný pro masovou výrobu. Sainte-Clare Deville poprvé v historii vyrobil nezanedbatelné množství hliníku. Deville vyráběl hliník redukcí oxidu hlinitého draslíkem. Hliník byl lesklý, světlý, stálý, lehký a dosahoval vysoké pevnosti. Jediná nevýhoda byla stále v jeho ceně. Ve snaze snížit cenu produktu Deville nahradil při redukcí oxidu hlinitého draslík sodíkem. Mezitím byla v Německu vynalezena nová metoda elektrolýzy. Tuto metodu úspěšně využil pro výrobu hliníku Paul Louis Héroult a nezávisle na něm také Charles Martin Hall. Metoda elektrolýzy se s malými úpravami používá k výrobě hliníku dodnes. Na přelomu 19. a 20. století se hliník začal hojně používat například na stavbu vzducholoží nebo se z něj začaly vyrábět některé části motoru. Následovali snahy o výrobu slitin hliníku a tím zlepšení mechanických vlastností. Obě světové války přinesly skokový posun ve všech vědních oblastech a hliník nezůstal pozadu. Hliník začal být velmi oblíbený u leteckých konstruktérů, kvůli své nízké hmotnosti a velké pevnosti. V současné době se hliník využívá zejména v automobilním průmyslu a elektrotechnice.

2.2 Výroba hliníku [4], [5], [7]

Hliník je nejvíce zastoupeným kovem v zemské kůře, nachází se v přírodě v podobě bauxitu. Surovina bauxit se skládá z oxidu hlinitého, oxidu železa, Titanu a křemíku, přičemž oxid hlinitý je zastoupen nadpolovičně. Výroba hliníku ve velkém množství začala poměrně v nedávné době a to z toho důvodu, že hliník není možné jednoduše vyredukovat ve vysoké peci jako železo. Bylo tedy nutné nejdříve vynalézt a poté technicky zvládnout vhodnou metodu pro výrobu hliníku. Touto vhodnou metodou se stala elektrolýza, její velkou výhodou je čistota hliníku na konci procesu, naopak nevýhodou tvorba oxidu uhelnatého na grafitové anodě. Před samotnou elektrolýzou je nutno bauxit přechistit. Při dosažení teploty 950 °C se během elektrolýzy na katodě vylučuje hliník a na anodě se kyslík. Tento proces je velmi energeticky náročný a je také zapotřebí velké množství surovin.

2.3 Vlastnosti hliníku [4], [5]

Hliník je stříbrný, lesklý kov řazený mezi lehké kovy z důvodu jeho hustoty 2700 kg/m^3 . Stejně jako měď nebo nikl, krystalizují atomy hliníku v kubicky plošně centrovanou mřížku. Teplota tání hliníku je přibližně 660°C . Mezi významné vlastnosti patří vynikající tepelná vodivost při pokojové teplotě, která činí 25 W/m.K . Přísady v hliníku mají neblahý vliv na vodivost, která s jejich množstvím rapidně klesá. Jak už bylo řečeno elektrolýzou bauxitu lze získat hliník s velkou čistotou, když ovšem proces elektrolýzy opakujeme můžeme docílit ještě vyšší čistoty. Nebývale významnou vlastností hliníku je jeho schopnost odolávat vnějším vlivům, tedy odolávat korozi. Je to díky tomu, že hliník tvoří s kyslíkem velmi odolný oxid hlinitý Al_2O_3 . Tento oxid hlinitý tvoří na povrchu hliníkového tělesa vrstvu. Tloušťka této vrstvy je do 10 nm . Hliník bez přísad nevykazuje nijak výjimečné mechanické vlastnosti a pro konstrukční účely je nevhodný. Legováním se jeho vlastnosti dají velmi dobře zlepšit. Přidáváním legovacích prvků vzniká široká škála nových slitin a roste i významnost jejich zastoupení v širokém spektru oborů.

2.4 Slitiny hliníku

Jak už bylo řečeno, důvodem pro tvorbu slitin hliníku je, jako například u železa, zlepšení nebo změna vlastností jako jsou pevnost v tahu, tepelná odolnost, obrobitelnost atd. Více než sto let zpracování a vývoje hliníku přineslo velké množství slitin s různými vlastnostmi, které odpovídají potřebám mnoha oborů. Různorodost hliníkových slitin lze dobře vidět na rozsahu pevnosti v tahu, která se pohybuje od 100 do 700 MPa . Hliníkové slitiny lze rozdělit podle několika kritérií.

Nejjednodušší dělení slitin je podle vytvrzování na deformační vytvrzování a vytvrzování stárnutím. Z pohledu zaměření této práce je ovšem nejdůležitější dělení hliníkových slitin dle legujících prvků. V této skupině se nacházejí slitiny s obsahem legur od 0 do 7% . Těmito prvky mohou být: mangan, hořčík, měď, zinek nebo křemík. Někdy jsou legující prvky v kombinaci jako například hořčík a křemík u slitin s označením 6000 nebo třeba zinek a hořčík jako u slitin 7000.

Dále lze slitiny rozdělit do osmi slitinových skupin podle legujícího prvku. Slitiny 1000, 3000, 5000 a 8000 série jsou deformačně vytvrditelné naopak slitiny 6000, 2000, 7000 a 4000 se vytvrzují stárnutím. Jelikož produkty firmy IFE se vyrábí ze slitin AW 6060 což je slitiny 6000 série, budeme se zabývat hlavně sérií 6000.

2.4.1 Série 6000 [8]

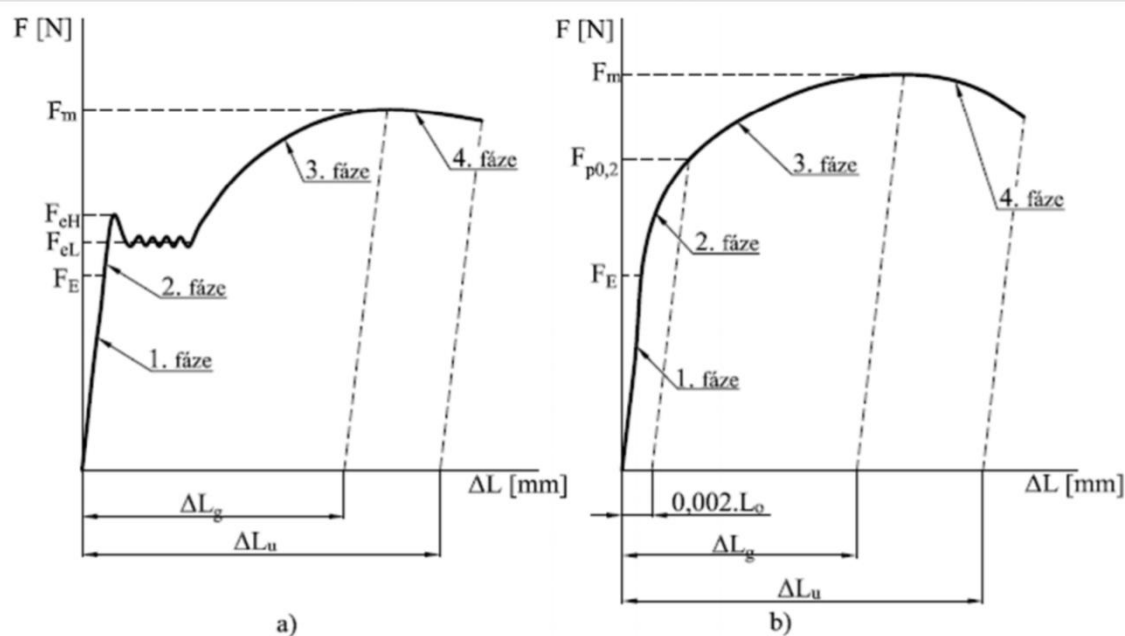
Slitiny této série obsahují legující prvky mangan($0,5 - 1,5\%$) a křemík($0,5 - 1,5\%$), jako přídavné prvky se používají měď a chrom. Pevnost v tahu těchto slitin je $200 - 320 \text{ MPa}$. Tyto slitiny jsou významné díky vlastnostem při teplém zpracování jako je válcování za tepla, protlačování nebo kování. Významná je také jejich korozivzdornost hlavně na vzduchu. Lze je dobře svařovat a také formovat za studena a například

eloxovat. Slitina 6060 je hojně využívána pro protlačování. Je spousta variant s různými obsahy hořčíku a křemíku, popřípadě přísadami mědi a chromu. U této slitiny je všechno podřízeno vlastnostem jako jsou protlačitelnost, kvalita povrchu, použitelnost pro eloxování a mechanické vlastnosti.

3 MECHANICKÉ VLASTNOSTI [8][14][15] [16]

3.1 Zjištění základních materiálových vlastností pomocí zkoušky tahem [8][14][16]

Nejčastější zkouškou pro zjištění základních vlastností materiálu je zkouška tahem. Tato zkouška je vždy prováděna za normovaných podmínek na normalizovaném prvku. Hlavní parametry, které při této zkoušce sledujeme jsou mez pevnosti, mez kluzu, tažnost popřípadě kontrakce. Výsledek takovéto zkoušky tahem jsou grafy závislosti prodloužení na působící síle jako je následující graf:



Obr. 2 Pracovní diagram [14]: a) s výraznou mezí kluzu, b) s nevýraznou mezí kluzu

Máme dva druhy pracovních diagramů na obrázku 2a vidíme graf s výraznou mezí kluzu typický pro tvrdé oceli. Na obrázku 2b je graf s nevýraznou mezí kluzu, který lze pozorovat třeba u hliníku. U materiálu s nevýraznou mezí kluzu byl zaveden pojem smluvní mez kluzu. Byla určena smluvní hodnota kdy dochází k plastické deformaci, tato hodnota byla určena jako 0,2% celkové deformace označována jako $R_{p0,2}$.

Podle tohoto grafu můžeme rozdělit celý proces tahové zkoušky do čtyřech fází.

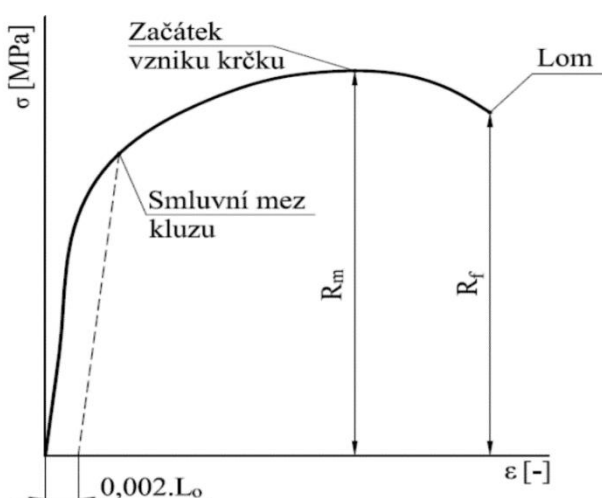
1. fáze - Jedná se o oblast pružných deformací. Vyznačuje se tím, že po odtažení se materiál vrátí do původního stavu. Tato část grafu končí v místě působení síly F_E , která se nazývá síla na mezí elasticity.

2.Fáze – Oblast od síly na mezi elasticity po mez kluzu. Zde se grafy začínají od sebe odlišovat. Na obrázku 6a se síla přestává deformovat lineárně. Za silou F_{eH} , kterou nazýváme síla na horní mezi kluzu, nastává oblast kdy při působení menší síly než F_{eH} dochází k relativně velkému prodloužení. Tato oblast je zakončena silou F_{eL} , kterou nazýváme silou na dolní mezi kluzu. Na obrázku 6b dochází za silou F_E , že se materiál přestal deformovat lineárně a postupně přechází do oblasti kde se materiál deformuje rovnoměrně. Zde je tato oblast zakončena silou $F_{p0,2}$, která se určí pomocí rovnoběžky s lineární částí grafu vedenou bodem 0,2% původní měřené délky tyče. Průsečík této rovnoběžky s grafem je potom smluvní mez kluzu a odtud jednoduše získáme sílu na mezi kluzu $F_{p0,2}$.

3.Fáze – Za mezi kluzu nastává oblast trvalých rovnoměrných deformací. Materiál se trvale deformuje, díky rostoucímu zatížení. Zatížení roste až do bodu zaškrcení v místě, kde je maximální síla F_m dosažená při zkoušce.

4.Fáze – Oblast nerovnoměrných plastických deformací. Začíná na bodu zaškrcení při maximální síle. Pokračuje tvorbou tzv. krčku, což je zužování materiálu až do lomu. V této oblasti se materiál prodlužuje pouze v krčku, kde také potom dochází k lomu.

Kvůli nutnosti porovnávání různých tahových zkoušek a různých materiálu se graf závislosti deformace na síle, nahrazuje grafem závislosti napětí σ na poměrném přetvoření ε . Tento graf nazýváme smluvní diagram.



Sílu a deformaci můžeme přepočítat pomocí následujících vzorců:

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

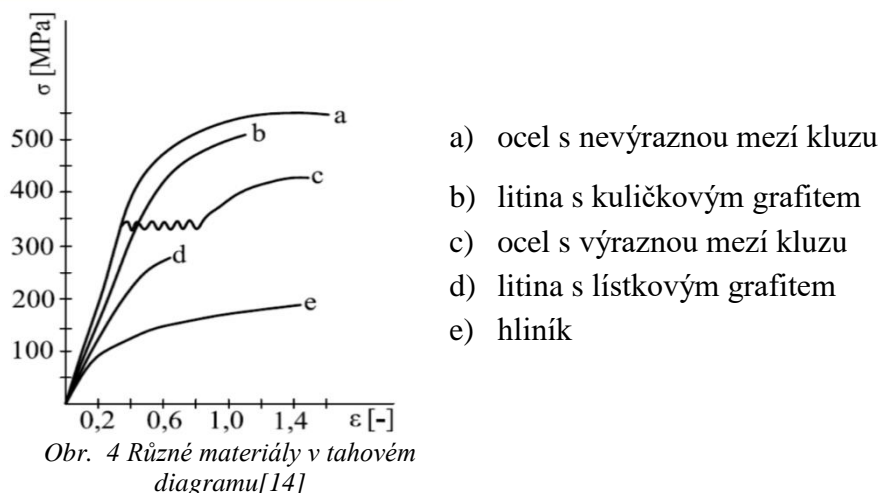
σ [MPa] - smluvní napětí

ε [-] – poměrné přetvoření

Obr. 3 Smluvní diagram napětí - deformace[16]

3.1.1 Znázornění chování různých materiálů v Hookovkém prostoru [14]

Pro dokreslení, lepší pochopení a představu jsou na obrázku 4 znázorněny vybrané materiály v tahovém diagramu v oblasti kde platí Hookův zákon, to je v oblasti do meze kluzu.

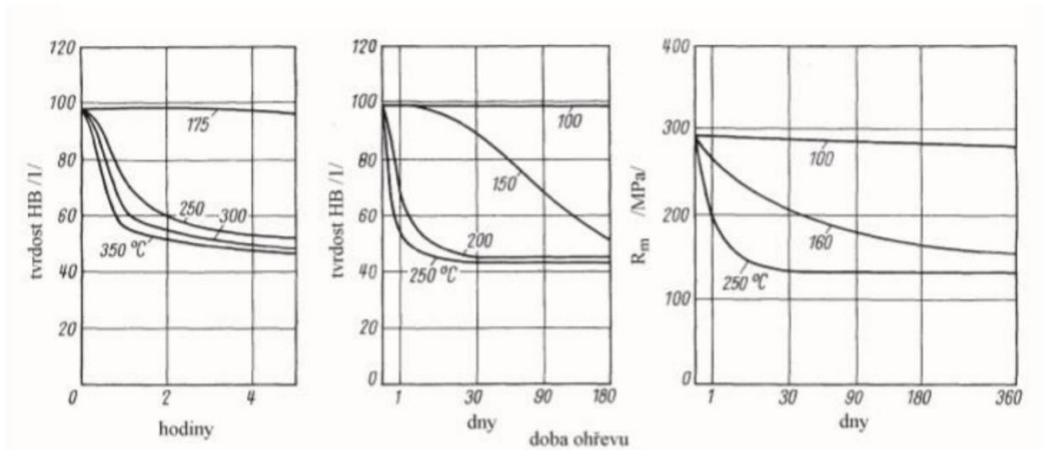


3.2 Mechanické vlastnosti za zvýšených teplot [15]

Jelikož svařování se děje za zvýšených až vysokých teplot je nutné uvést jak se materiál bude chovat, když jej zahřejeme. Teplota má velký negativní vliv na jak mez pevnosti R_m tak i na mez kluzu $R_{p0,2}$. U kovových materiálů můžeme pozorovat dva typy namáhání za zvýšené teploty. První je, že z důvodu zrychlené difúze atomu za vyšší teploty je možné, že materiál po zahřátí a následném zchladnutí nebude mít stejné vlastnosti jako před tímto procesem. Druhý typ je, že materiál je přímo při zvýšené teplotě namáhám. V tomto případě teplota urychluje proces degradace materiálu a k poškození a lomu, může dojít i pod mezí $R_{p0,2}$. Popsat chování materiálů za zvýšených teplot nám umožňují následující čtyři typy zkoušek:

- a) zkoušky prováděné na materiálu za pokojové teploty, přičemž byl materiál předtím dlouhodobě vystaven vysoké teplotě.

Příklad takovéto zkoušky můžeme vidět na obrázku 5, kde je znázorněn vliv ohřevu na tvrdost a pevnost určenou při pokojové teplotě pro slitinu G-AlSi10Mg, která po umělém stárnutí.



Obr. 5 Vliv ohřevu na tvrdost a pevnost stanovenou při pokojové teplotě u slitiny G-AlSi10Mg, která stárněla před ohřevem uměle[15].

- b) zkoušky prováděné za určité teploty, přičemž byl materiál dlouhodobě této teplotě vystaven.

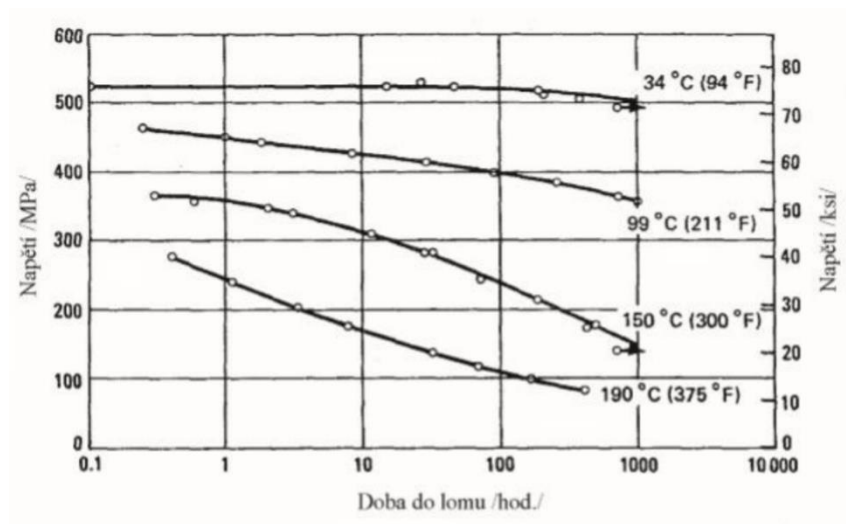
Zkouška probíhá bez zatížení a zkoumá se tedy pouze dlouhodobý vliv teploty na materiál, obvykle je tato doba 1000 až 10000 hodin.

- c) zkoušky za zvýšené teploty ale materiál je této teplotě vystaven pouze v průběhu zkoušky.

Tato zkouška se používá pro součásti, u kterých se zkoumá vliv zatížení a teploty a nepočítá se s případnými strukturálními změnami způsobenými vlivem teploty.

- d) Dlouhodobé zatěžovací zkoušky, kdy je materiál trvale vystaven jak teplotě tak napětí.

Do této skupiny zkoušek patří zkoušky tečení neboli creep. Pomocí creepu se sledují materiály vystaveny dlouhodobě teplotě vyšší jak 100 °C. Creepová zkouška se musí pro každý materiál provádět zvlášť, jelikož každý materiál má jiné složení a strukturu. Výstupem creepové zkoušky je křivka tečení neboli creepová křivka. Příkladem takovéto křivky je křivka na obrázku č. 6.



Obr. 6 Pevnost při creepu v závislosti na čase do lomu pro různé teploty pro slitinu $AlZn_6MgCu$ po umělém stárnutí.

3.3 Testování svarových spojů dle normy EN ISO 15614-2 [28] [29]

Požadované zkoušky: Zkoušky mohou být nedestruktivní (dále jen NDT) a nebo destruktivní. Všechny zkoušky musí vyhovovat normám, v tomto případě se jedná o normu ČSN EN ISO 15614-2 [26]. V tabulce č. 1 můžeme vidět druhy požadovaných zkoušek pro tupý spoj na plechu.

Tab. 1 Požadované zkoušky pro tupý svar na plechu. [26]

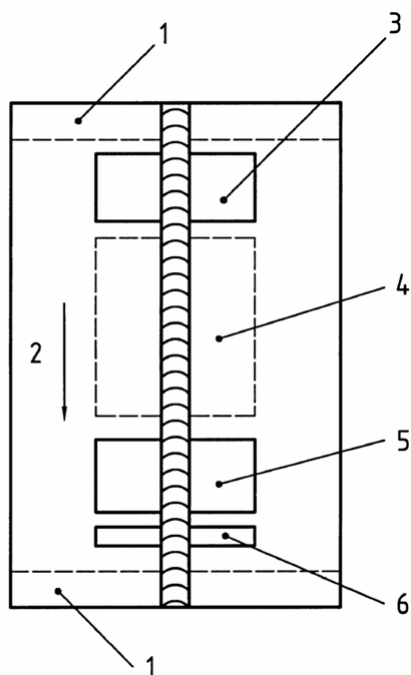
Druh zkoušky	Rozsah zkoušení	Norma
Nedestruktivní zkoušky		
Vizuální kontrola	100%	ISO 17637
Radiografická zkouška	100%	ISO 17636
Ultrazvuková zkouška	100%	EN 1714
Kapilární zkouška	100%	EN 571-1
Destruktivní zkoušky		
Příčná zkouška tahem	2 zkušební vzorky	ISO 4136
Příčná zkouška lámavosti pro lité materiály nebo kombinace litých a tvářených materiálů	Zkušební vzorky ze strany kořene a 2 z lící strany	ISO 5173
Zkouška rozlomením pro lité materiály nebo kombinace litých a tvářených materiálů	Zkušební vzorky ze strany kořene a 2 z lící strany	ISO 9017
Kontrola makrostruktury	1 zkušební vzorek	ISO 17639
Kontrola mikrostruktury	1 zkušební vzorek	ISO 17639

NDT zkoušky: Jednotlivé NDT zkoušky musí být provedeny dle normy ČSN EN ISO 15614-2 [26] a na zkušebních vzorcích, o kterých bude pojednáno níže. Podle typu spoje, materiálu nebo typu svařování musí být provedeny NDT zkoušky uvedené v tabulce č. 1.

Destruktivní zkoušky: Všechny destruktivní zkoušky musí být provedeny podle příslušných norem na odpovídajících zkušebních vzorcích. Tyto normy jsou uvedeny v tabulce č. 1. Zkušební vzorky jsou poté rozebrány podrobněji níže.

Pokud je nutno z jakéhokoli důvodu provést zkoušky opakovaně, je nutné provést tuto zkoušku na nově svařeném kuse. Jestliže kterýkoli ze vzorků nesplňuje požadavky zkoušek, je nutné celý postup svařování považovat za nevyhovující.

Zkušební vzorky: Zkušební vzorky musí být odebíraný a testování dle normy ČSN EN ISO 15614-2 [26]. Zkušební vzorky pro náš případ, tedy tupý spoj na plechu, je nutno odebrat dle obrázku č.7.



Obr. 7 Umístění zkušebních vzorků pro tupý spoj na plechu [26]

Legenda k obrázku č.7:

1. Odpad 25 mm
2. Směr svařování
3. Oblast pro:
 - a. Jeden vzorek pro zkoušku tahem
 - b. Vzorky pro zkoušku lámavosti nebo zkoušku rozlomením
4. Oblast pro:
 - a. Doplnující zkušební vzorky, pokud jsou požadovány
5. Oblast pro:
 - a. Jeden vzorek pro zkoušku tahem
 - b. Vzorky pro zkoušku lámavosti nebo pro zkoušku rozlomením
6. Oblast pro:
 - a. Jeden vzorek pro kontrolu makrostruktury
 - b. Jeden vzorek pro kontrolu mikrostruktury

Kvalifikace: Aby bylo možno vyhovět požadavkům normy ČSN EN ISO 15614-2 [26], musí být splněny kromě zkoušek svaru i následující podmínky. Kvalifikace postupu svařování platí pro dílny a montážní prostory, které jsou pod stejným technickým a jakostním dozorem výrobce. Pro každý materiál nebo kombinaci materiálů je nutné provést vlastní postup svařování.

Rozsah kvalifikace se liší podle tloušťky materiálu, typu svaru a tvaru svařovaných součástí. Pro případ svařování tupého svaru o tloušťce 3 mm je rozsah kvalifikace 1,5 mm až 6 mm.

Svařování: Kvalifikace je platná pouze pro jeden určitý typ svařování, kterým se svařoval daný vzorek. Polohy ve kterých lze svařovat jsou dány normou ČSN EN ISO 6947 [29]. Kvalifikaci lze také vystavit jen pro jeden typ svařovacího proudu stejnosměrný, střídavý nebo pulzní. Dále pro hliník a jeho slitiny musí být v pWPS uvedeno tepelné zpracování po svařování.

Specifické údaje pro metodu 131: Kvalifikace je dána pouze pro použitý plyn, pro použitý přídavný materiál a pro použitý typ jeho vedení ke svaru.

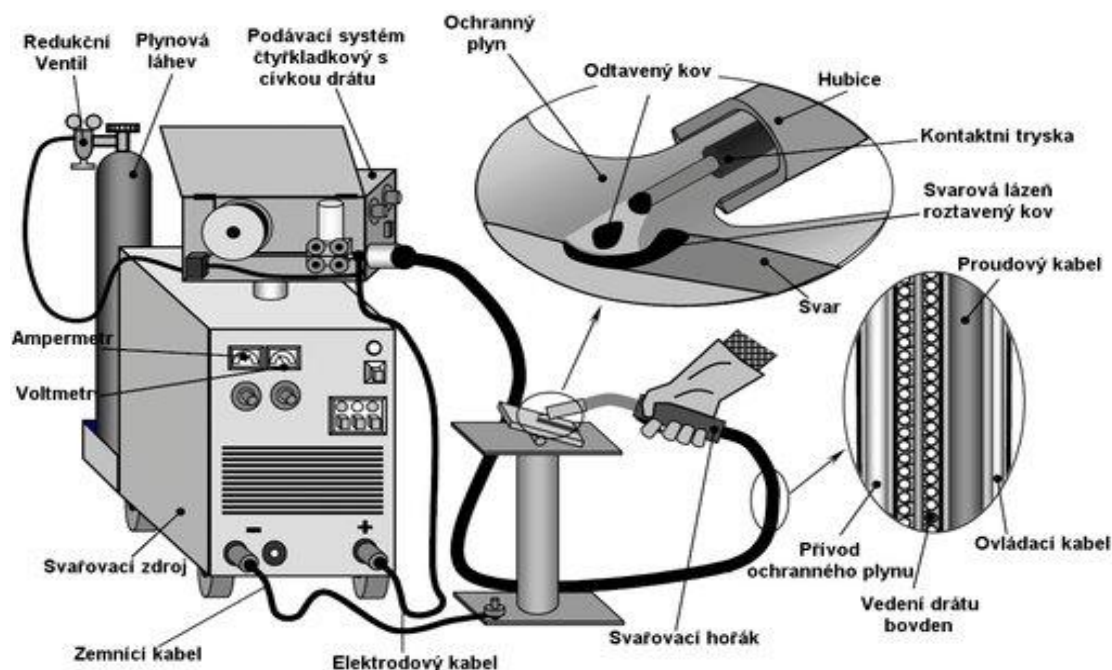
Protokol o kvalifikaci WPQR: Protokol o kvalifikaci postupu svařování, dále jen WPQR, je přehled výsledku zkoušek pro zkušební vzorky. Pokud nebyly v průběhu zkoušení nalezeny žádné nepřijatelné vlastnosti, poté musí být WPQR datována a potvrzena příslušnou zkušební organizací.

4 SVAŘOVÁNÍ HLINÍKU A HLINÍKOVÝCH SLITIN [5], [9], [10], [12], [13], [14], [15] [21], [22], [23], [25]

Svařování je metoda při které vznikají nerozebíratelné spoje. Aby mohly tyto spoje vzniknout musíme na ně působit jistým tlakem nebo dodávat určité množství tepla, popřípadě kombinací těchto činností. U specifických metod svařování se někdy také přidává přídavný materiál. Takto vzniklým součástem se říká svařenec. Svařování v mnoha případech není konečnou metodou úpravy materiálu, proto se svařence dále tepelně nebo mechanicky upravují. Hlavní výhodou je pevnost a těsnost spoje. Oproti jiným metodám je svařování daleko jednodušší a tím umožňuje úsporu času a práce. Nevýhodou je změna struktury a tudíž vlastností v oblasti svaru. Z tohoto důvodu je nutná další práce se svařencem.

4.1 Svařování v ochranné atmosféře inertního plynu tavící se elektrodou – Metoda 131 [10]

Tato metoda má anglický název Metal Inert Gas – MIG. Rozvoj této metody vzrostl až rozvojem hliníkových konstrukcí lodí, aut nebo letadel. Jedním z důvodů rozšíření je velké množství přídavných materiálů a ochranných plynů, k dispozici je taky mnoho svařovacích zařízení, které je možno použít. Je zde také množnost automatizace nebo robotizace. Podstata metody je založena na hoření oblouku mezi tavící se elektrodou a svařovaným materiálem. Drát je podáván drátovým podavačem zabudovaným do svařovacího zařízení. Současně s drátem je k místu svaru také přiváděn inertní plyn. Metoda je velmi univerzální jde ji použít ve všech polohách a svařovat materiály o minimální tloušťce 0,8 mm.



Obr. 8 Schéma svařování metodou 131[21]

4.1.1 Zdroje pro svařování metodou 131 [10]

Při svařování metodou 131 se téměř výhradně používá zdrojů stejnosměrného proudu. Kladný pól je spojen s elektrodou a záporný pól se základním materiálem. Zdroje mají plochou Volt-Ampérovou charakteristiku a jsou schopny udržovat konstantní napětí a také délku oblouku. Když se napětí na zdroji změní tak se změní i svařovací oblouk. To znamená, že když délka oblouku vzroste dojde ke snížení velikosti proudu a snížení rychlosti podávání drátu a poté proces opakuje akorát v opačném pořadí. Při svařování si svářeč předem nastaví hodnotu okolo které proud osciluje.

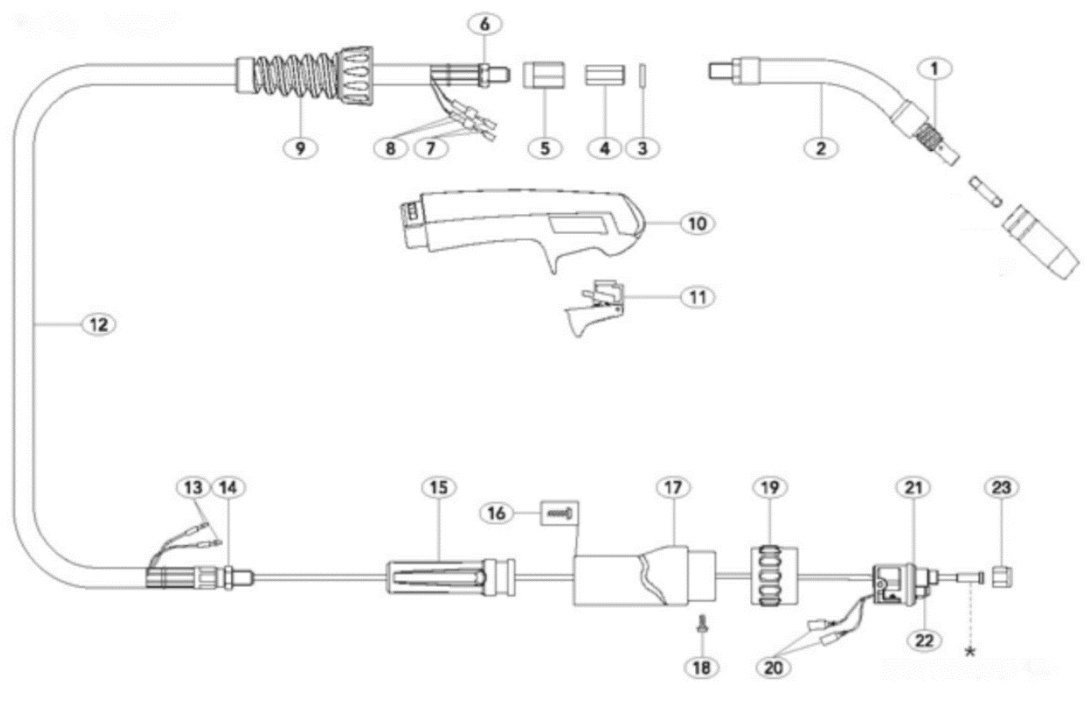
4.1.2 Podavače drátu [10]

Svařování metodou 131 je svařování tavící se elektrodou, tudíž při této metodě je drát podáván automaticky přímo do elektrody pomocí drátového podavače. Výhodou je, že díky podavači se drát nepoškodí nebo nedeformuje. Mechanismus podavače spočívá v kladkovém mechanismu, který má mnoho provedení například jednokladkové, dvoukladkové nebo s mimoběžnými osami.

4.1.3 Svařovací hořáky [10]

Hořáky pro svařování metodou 131 mají specifické nároky. Mají za úkol přivádět přídavný materiál do svarové lázně, současně musí do drátu přivádět také elektrický proud a do okolí svaru ochrannou atmosféru. Hořáky jsou vystaveny vysokým teplotám, kvůli tomu je třeba je chladit. Při nižších příkonech nám postačí chlazení ochranným inertním plynem, který tvoří ochrannou atmosféru. Při příkonech vyšších se používá chlazení kapalinou, není třeba žádné speciální kapaliny postačí destilovaná voda. Všechny hořáky lze rozdělit do dvou základních skupin na strojní a ruční. Strojní mají válcovou upínací část naopak ruční mají rukojeť aby se svářeči usnadnila manipulace.

Každý hořák je vybaven kontaktním průvlakem, který má za úkol rovnoměrně přivádět proud do drátové elektrody. Plynová tryska umístěná až na konci svařovacího hořáku slouží k usměrnění proudu plynu.



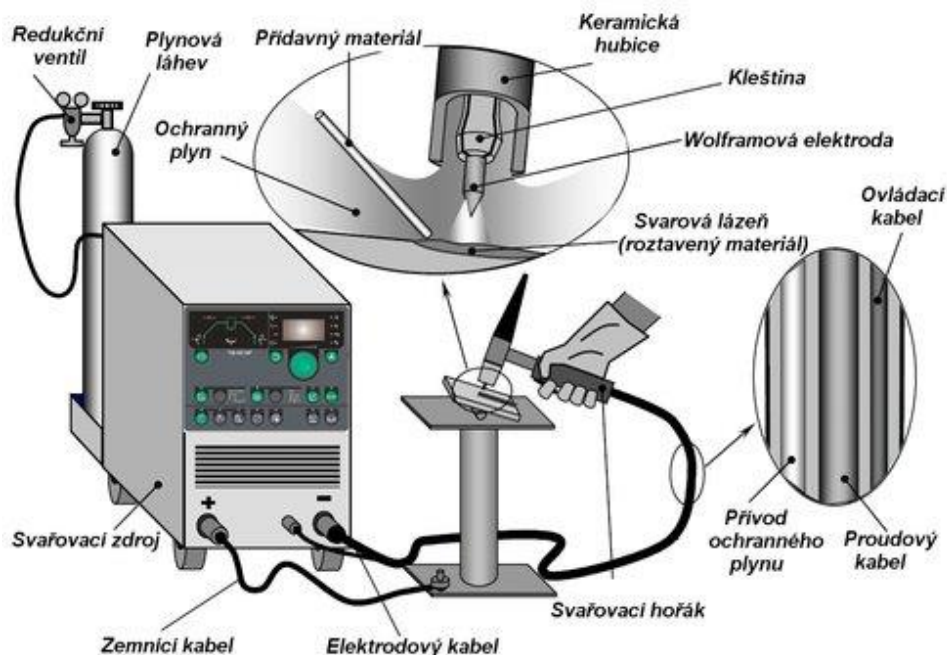
Obr. 9 Svařovací hořák chlazený plynem pro svařování metodou 131[25]

1 – Pružina, 2 – Trubka hořáku, 3 – Mezikus, 4 – Šestihran, 5 – Mezikus rukojetě, 6 – Matice, 7 – Kabel terminál, 8 – Krytka kabelu, 9 – Ochrana kabelu, 10 – Rukojeť, 11 – Tlačítko, 12 – Kabel, 13 – Kabel terminál, 14 – Matice pojistná, 15 – Chráníč kabelu, 16 – Šroub, 17 – Kryt, 18 – Šroub, 19 – Matice, 20 – Konektor, 21 – Zástrčka, 22 – "O" kroužek, 23 – Matice bovdenu

4.2 Svařování v ochranné atmosféře inertního plynu netavící se elektrodou - Metoda 141 [10]

Metoda má v angličtině označení TIG – Tungsten Inert Gas nebo také WIG – Wolfram Inert Gas. Společně s metodou svařování MIG patří tato metoda k nejrozšířenějším na světě. Při svařování touto metodou hoří oblouk mezi netavící se elektrodou a základním materiálem. Elektrodu i tavnou lázeň chrání před vnějšími vlivy ochranná atmosféra ve formě netečného plynu. Tento plyn má vysokou čistotu 99,995 %, velmi často se používá argonu, helia nebo jejich směsí. Netavící se elektroda je z wolframu kvůli nutnosti odolávání vysokým teplotám v oblasti svaru. Je možno svařovat bez přídavného materiálu nebo s ním. Přídavný materiál je ve formě drátu a je možno ho přidávat ručně nebo automaticky pomocí drátového podavače, který je schopný měnit rychlost podle postupu svařování. Sváret lze stejnosměrným proudem, například u ocelí, tak i k střídavým proudem především pro hliník. Hlavní výhody této

metody svařování jsou, že svary mají malou tepelně ovlivněnou oblast, minimální deformace a svarová lázeň je dobře a snadno viditelná.



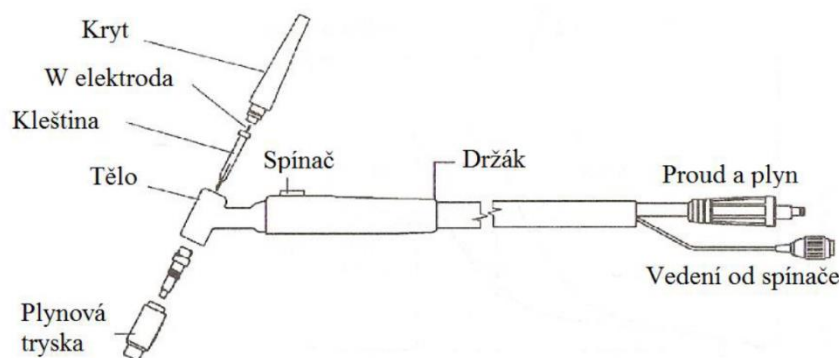
Obr. 10 Schéma svařování metodou 141[22]

4.2.1 Svařování střídavým proudem [5]

Svařování střídavým proudem se používá kvůli svému čistícímu účinku, kdy v jedné půlperiodě probíhá čištění materiálu a v druhé probíhá svařování. Svařování střídavým proudem se používá pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin. Čištění hliníku se provádí z toho důvodu, že povrchová vrstva oxidu hlinitého má několikrát vyšší teplotu tání než samotný hliník a tudíž by vrstva bránila vytvoření svarové lázně.

4.2.2 Hořáky pro svařování metodou 141 [10]

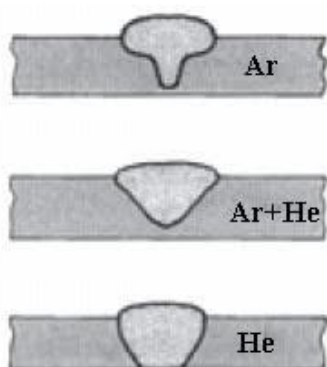
Svařovací hořáky jsou součástí nejvíce vystavené teple z celého svařovacího zařízení. Hořák zajišťuje přívod proudu k elektrodě a také přívod ochranné atmosféry. Můžeme je rozdělit na ruční a strojní. Součástí hořáku je kleština, jenž zajišťuje pevné upnutí wolframových elektrod. Součástí je hořáku je také plynová tryska, která je přirozeně velmi tepelně zatíženou částí hořáku. Plynová tryska přivádí ochrannou atmosféru k místu svaru. Velikost trysky se volí podle velikosti plochy, kterou chceme chránit atmosférou. Abychom byli schopni kontrolovat množství plynu proudícího ke svaru, používáme průtokoměry. K regulaci proudu ochranné atmosféry slouží také plynové čocky, které jsou schopné regulovat laminární proudění plynu.



Obr. 11 Hořáky pro svařování metodou 141[10]

4.2.3 Wolframové elektrody [10]

Pro metodu svařování 141 se používají netavicí se wolframové elektrody, ze spékaného wolframu. Wolfram má velmi vysokou teplotu tání $3380\text{ }^{\circ}\text{C}$ a také teplotu varu $5700\text{ }^{\circ}\text{C}$. Elektrody jsou vyráběny jak z čistého wolframu o čistotě 99,9% nebo i s příměsí thoria, lanthanu nebo zirkonu ve formě oxidů. Přísadou oxidů dojde k snížení teploty ohřevu až o $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, tím pádem legury zvyšují životnost. Elektrody se volí podle toho, kde a jak je chceme použít a také jaký proud jimi bude procházet. Pro představu spotřeba elektrody při svařování je asi 4 mm za hodinu.



Obr. 12 Vliv ochranného plynu na průřez svaru[24]

4.3 Ochranné inertní plyny [10]

Hliník se svařuje výhradně inertními nebo taktéž netečnými plyny, kterými jsou Argon a Hélium. Ochranná plynná atmosféra se používá při svařování, při kterých nechceme aby svařované součásti, svarová lázeň a elektroda byly vystaveny přístupu vzduchu. Plyn také může zlepšovat hoření oblouku.

4.3.1 Argon [10]

Argon je jednoatomový plyn, bez barvy, chuti a zápachu patřící do 18. skupiny periodické tabulky nazývané vzácné plyny. Jedná se o inertní plyn, který v přírodě nevytváří žádné sloučeniny. Argon lze získat destilací vzduchu a odstraněním kyslíku. Svařovací oblouk se v proudu Argonu velmi dobře zapaluje, je to z důvodu jeho špatné

tepelné vodivosti. Čistý Argon se používá při svařování menších tlouštěk materiálu, protože má nižší tepelný výkon a není schopený natavit materiál do větší hloubky. [10]

4.3.2 Hélium [12]

Hélium je další ze skupiny vzácných plynů, který se používá jako ochranná atmosféra pro svařování. Jedná se o jednoatomový plyn, bez barvy, chuti a zápachu. Je lehčí než vzduch to zhoršuje ochrannou atmosféru. Hélium je velmi špatně tepelně vodivý, to má negativní vliv na hoření oblouku v Héliu. Naopak od Argonu má Hélium dobrý tepelný výkon a používá se pro tlustší materiály. Hélium se získává separací vybraných druhů zemního plynu.

4.3.3 Směsi Argonu a Hélia [12] [13]

Směs Argonu a Hélia v sobě spojuje výhodné vlastnosti obou plynů. S obsahem Hélia se zvyšuje tepelný výkon a tím pádem i tvar a rozměry svaru. Nejčastějšími koncentracemi Argonu a Hélia jsou 70 % Ar + 30 % He, Ar – He 50/50, 30 % Ar + 70 % He. Čistota nebo poměr jednotlivých plynů pro svařování metodou 131 jsou normalizovány.

4.4 Přídavné materiály [10]

Přídavný materiál má několik základních důvodů proč se používá. Například má za úkol doplnit svar tak aby bylo dosaženo požadované velikosti a tvaru nebo zlepšit vlastnosti svaru pomocí prvků obsažených v přídavném materiálu.

4.4.1 Přídavné materiály pro metodu 131 [10]

Dráty se dodávají navinuty na cívkách dodávaných po různých velikostech pro hliník jsou jen 7 kg cívky a 70 kg sudy hlavně pro ruční svařování. Pro velké firmy, kde je svařování automatizované dodávají balení až o hmotnosti 70 kg, takže je svářeč schopen svařovat po delší dobu. Dráty jsou jak plného průřezu tak i plněné legujícími prvky, které zlepšují kvalitu svaru.

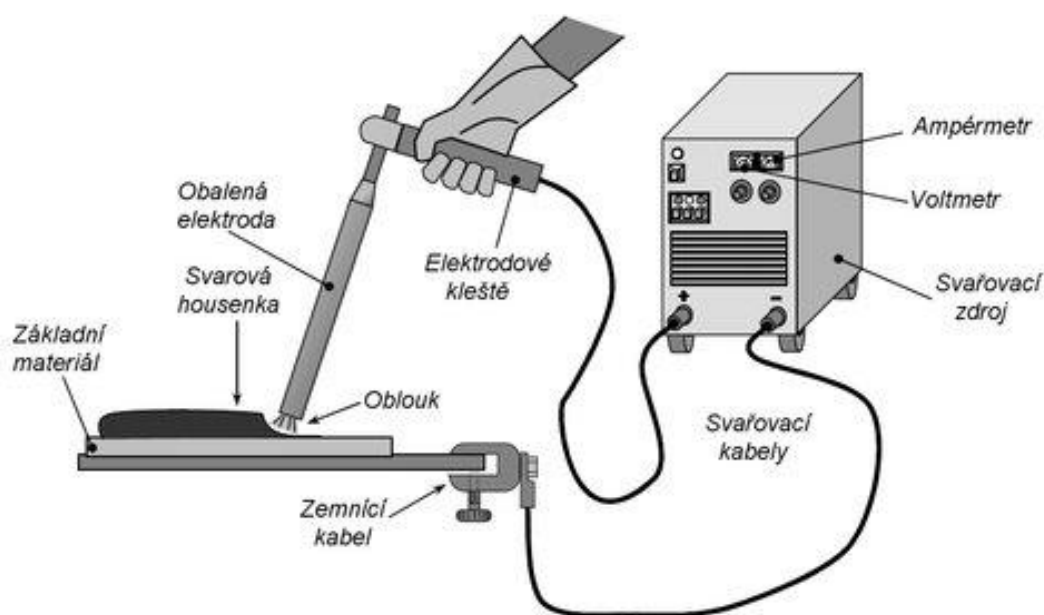
4.4.2 Přídavné materiály pro metodu 141 [10]

Základní rozdělení je přídavných materiálů pro metodu 141 je na svařovací tyčky a na svařovací dráty. **Svařovací tyčky** se používají pro ruční svařování. Mají dostatečnou pevnost, tuhost a délku. Používají se jak plné tak plněné legujícími přísadami. **Svařovací dráty** jsou naopak určeny pro svařování automatizované. Dráty jsou dodávány s přesnými rozměry a průměry.

4.5 Ruční obloukové svařování obalenou elektrodou – metoda 111

[10] [14], [23]

Metoda ručního obloukového svařování je nejstarší metodou obloukového svařování. Stále je velmi využívána z důvodu jednoduchosti, univerzálnosti a kvůli nízkým nákladům. Využívá se zejména v opravárenství. Klade vysoké nároky na svářeče. Metoda nese číselné označení 111. Při svařování metodou 111 se materiál spojuje pomocí tepla z elektrického oblouku mezi obalenou elektrodou a základním materiálem. Tato metoda je použitelná na svařování téměř všech materiálů a svařování ve všech polohách. Ovšem pro hliník je poměrně méně výhodná. Svařovací proud je od 20 A do 2000 A, napětí elektrického oblouku od 10 V do 50 V a teplota zhruba 5000 °C. Příklad svařování metodou 111 lze vidět na obrázku 13.



Obr. 13 Schéma svařování metodou 111[23]

4.5.1 Svařovací zdroje pro metodu 111 [10]

Svařovací zdroje pro tuto metodu mají kromě bezpečnosti a legislativních předpisů splňovat řadu dalších požadavků, které jsou nezbytné pro úspěšné svařování. Zdroje musí být odolné vůči zkratům, ke kterým během svařování může dojít. Jejich Volt-Ampérova charakteristika vyžaduje velmi specifické chování. Statická charakteristika bezpodmínečně musí odpovídat podmínkám a způsobu svařování, naopak dynamická musí být taková aby napětí v případě zkratu bylo schopno opět rychle vzrůst. Samozřejmě zdroj by měl umět regulovat napětí podle potřeby svářeče nebo svařování. Máme dva typy zdrojů:

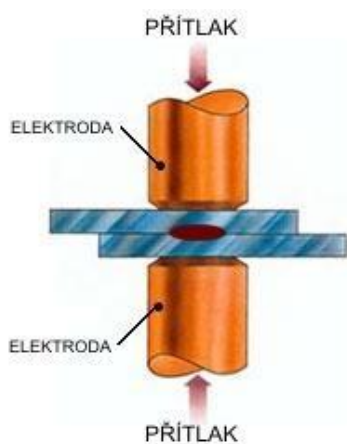
Zdroje střídavého proudu – Používají se jednofázové klasické transformátory. Klasická konstrukce transformátorů, kdy kolem jádra z transformátorových plechu, je

omotán drát do primárního a sekundárního vinutí. Proud vzniká tak, že primární vinutí připojíme do sítě, tím vznikne v jádru elektromagnetické pole, které poté indukuje v sekundárním vinutí střídavé napětí.

Zdroje stejnosměrného proudu–Zdroje pro svařování stejnosměrným proudem se skládají z dynama a motoru. Dynamo je zdrojem pro svařovací oblouk. Motor je nejčastěji asynchronní s kotvou nakrátko. Svařovací agregát se skládá z motoru, dynama a ovládání.

4.5.2 Elektrody pro svařování metodou 111 [10]

Pro metodu 111 se používají jako přídavný materiál obalené elektrody. Elektrody lze rozdělit podle toho ke svařování kterého kovu jsou určeny, například pro nízkolegované oceli, barevných kovů nebo šedé litiny. Dále je můžeme rozdělit podle poměru celkového průměru elektrody s obalem ku průměru jádra elektrody na tenké balené, středně balené, tlustě balené a velmi tlustě balené. Při svařování metodou 111 by měla být elektroda tvořena takovým materiálem, že při hoření uvolňuje plyny a ty poté vytvářejí ochrannou atmosféru okolo svarové lázně. Obal má naopak za úkol chránit elektrodu a zlepšit její zapalování a hoření.



Obr. 14 Schéma odporového svařování[20]

4.6 Odporové svařování – metoda 2 [10] [20]

Odporové svařování je spojování materiálu pomocí proudu procházejícího materiálem a současně působící síly na svařované součásti. Tím že prochází materiálem elektrický proud se materiál zahřeje a stane se tvárným, při dalším působení tlakem na součásti dojde ke spojení. Odporově lze svařovat všechny druhy konvenčních materiálu jako oceli, hliníkové plechy a jejich slitiny ale současně lze svařovat i materiály, které jsou méně časté jako třeba titan nebo zirkon. Mezi nejčastější metody odporového svařování patří bodové odporové svařování(metoda 21), švové odporové svařování(metoda 22) a výstupkové svařování(metoda 23). Příklad schématu odporového svařování je znázorněn na obrázku 14.

4.6.1 Parametry odporového svařování [10]

Při bodovém svařování závisí parametry na svařovacím proudu, přitlačné síle působící na materiál a také na době po jakou svařujeme.

Při jiném typu odporového svařování se parametry mohou lišit, jak je tomu například při svařování švovém nebo výstupkovém. Podle parametrů svařování rozlišujeme dva režimy svařování:

Tvrký režim svařování – Tvrký režim spočívá v tom, že teplo dodáváme do svaru vysokým proudem za krátkou dobu. Hlavní výhodou je krátký čas svařování a úspora energie. Díky krátkému času svařování není struktura v oblasti svaru tolik ovlivněna vloženým teplem a tudíž vznikají menší deformace a pnutí ve svaru a jeho okolí. Abychom byli schopni dodat do svaru proud o vysoké hodnotě, potřebujeme velmi výkonné stroje.

Měkký režim svařování – Měkký režim svařování je přesný opak tvrdého režimu, teplo se do svaru dodává pozvolně po delší dobu. Delší doba svařování má negativní vliv na produktivitu. Tím, že oblast svaru je po delší dobu vystavena dodávanému teplu, vznikají ve svaru a jeho okolí deformace a pnutí, které mohou vést k poškození svaru. Nespornou výhodou je, že nemusí být k dispozici zdroje s velkým příkonem.

4.6.2 Elektrody pro odporové svařování [10]

Elektroda je část svařovacího stroje, kde dochází ke přímému styku se svařovaným materiálem. Jako u ostatních metod i zde je nutné aby elektroda měla jisté specifické vlastnosti bez kterých by svařování bylo obtížné nebo nemožné. Elektroda je vždy zhotovena z materiálu na bázi mědi a to kvůli tomu že musí do svaru přivádět velký proud. Elektrodivý materiál by měl tedy být vysoce elektricky a tepelně vodivý, odolný za vysokých tlaků a teplot a pevný. V drtivé většině případů se používá slitina Cu-Cr. Měď kvůli své měkkosti za zvýšené by byla nežádoucí a při větším tlaku by se deformovala, proto je legována chromem který zvýší pevnost. Pro krajní případy se používají slitiny s větší pevností nebo větší vodivostí.

4.7 Svařování třením – FSW [15]

Anglický název zní Friction Stir Welding odtud používáme FSW. Svařování se děje pomocí rotačního třecího nástroje, který vyvíjí na materiál teplo a tlak potřebné ke spojení. Povrchy se nejprve deformují a rovnají a poté nastává vznik mikrosvarů. Teplota v místě svaru dosahuje až 80 % teploty tavení spojovaných kovů. Pro svařování není nutná žádná ochranná atmosféra. Svařování je poměrně tiché a neprodukuje se při něm žádné nežádoucí plyny. V neposlední řadě tato metoda umožnila dříve nesvařitelné materiály svařit.

4.8 Metody svařování hliníku a jeho slitin používané ve firmě IFE, a.s. [5], [10]

Metody používané firmou IFE pro svařování hliníku jsou metoda 131 a metoda 141. Lze svařovat jak čistý hliník tak jeho slitiny. Jak je uvedeno výše slitiny hliníku lze rozdělit podle legujících prvků do osmi skupin. Z těchto skupin jsou vhodné pro svařování slitiny série 1000, 2000 a 6000. Přídavný materiál volíme tak aby byl obdobný jako spojované materiály. Důležité je zabránit znečištění nebo poškození drátu

jak před svařování tak během svařování. Aby metoda byla pro svařování účinná je nutné odstranit z hliníku povrchovou vrstvu Al_2O_3 , z důvodů o kterých je pojednáno níže. Jde o metody, které umožňují čistící účinek, což v případě hliníku je velmi výhodné. V případě obou těchto metod se jedná o metody svařování v inertní ochranné atmosféře. Inertní plyn zamezuje přístupu vzduchu do oblastí svaru v průběhu svařování a tím brání degradaci a poškození svaru.

4.9 Problémy při svařování hliníku [12], [14]

Hliník je specifický materiál, který vyžaduje specifickou manipulaci. Toto specifické a nežádoucí chování lze snadno omezit a vyhnout se tak svarovým poškozením.

Povrchová vrstva Al_2O_3 - Hliník je velmi ceněný pro svoji odolnost vůči korozi a to kvůli vrstvě oxidu hlinitého (Al_2O_3), pro svařování je tato vrstva oxidu ale nepřipustná. Je to z důvodu nevodivosti oxidu hlinitého. Oxid hlinitý má také nesrovnatelně vyšší teplotu tání ($2050\text{ }^\circ\text{C}$) než hliník ($660\text{ }^\circ\text{C}$). Tyto vlastnosti při svařování zhoršují natavení materiálu. Vedle těchto vlastností je oxid hlinitý také hygroskopický, což znamená že na sebe váže vlhkost obsaženou ve vzduchu a to způsobuje pórovitost, která potom znehodnocuje svar. Před samotným svařováním hliníku a jeho slitin tedy musíme provést úpravu svařovaných součástí. Pro svařování je nutno vrstvu oxidu zcela odstranit buďto mechanicky broušením nebo chemicky mořením. Pro hliník je tedy velmi výhodné ho svařovat v ochranné atmosféře, která může zlepšit hoření oblouku nebo ochránit svarovou lázeň před oxidací.

Chování za vyšších teplot – Dobrá tepelná vlastnost způsobuje, že je nutno hliník před svařováním přehřívat. Teplota přehřevu je od $150\text{ }^\circ\text{C}$ do $300\text{ }^\circ\text{C}$. Je nutné teda mít výkonnější zdroje, které jsou schopny vyšších tepelných příkonů. Další vlastností je tepelná roztažnost. Ta způsobuje při vyšších teplotách porušení svarů. V neposlední řadě se při delším vystavení vyšším teplotám u některých slitin mohou změnit mechanické vlastnosti. Těmto problémům se dá částečně předejít volbou vhodné metody svařování. Hliník při vyšších teplotách nemění barvu, to znesnadňuje svářečům rozpoznání hranice svarové lázně a není lehké udržet správnou rychlost svařování. Při nesprávné rychlosti svařování mohou vznikat tzv. studené spoje, což je velmi slabé spojení materiálu, které se následně trhá.

Rozpustnost plynů v hliníku – Hliník je kov, který ve velkém množství rozpouští plyny, což způsobuje pórovitost svarů. Je tedy nutné svařované součásti velmi dobře vyčistit. Poté se součásti nesmí vystavit kontaktu s vlhkostí nebo mastnotou. Je třeba dbát zvýšené opatrnosti při manipulaci jak se svařovanými součástmi tak i s přídavnými materiály a svářečím zařízením, které mohou také obsahovat vlhkost. Vlhkost se může také vyskytovat v hadicích vedoucích ochranný plyn k svarové lázni.

5 PARAMETRY A PODMÍNKY SVAŘOVÁNÍ VZORKU [26], [27], [28], [29], [30]

Nové svařování vzorku proběhlo ve firmě IFE-CR v Modřicích, z důvodu nevyhovující kvalifikace postupu svařování (WPQR) bez tepelného svařování v minulosti. Svařování obou vzorků probíhalo metodou 131 (MIG) na svářečce od firmy EWM pomocí impulsního proudu. Pro lepší přehlednost jsou vzorky rozděleny na starý vzorek, z roku 2012, a nový vzorek, z roku 2019.

5.1 Svařované materiály

Součásti byly z materiálu EN AW-6060. Tento materiál má následující složení dle normy ČSN EN 573 [26]:

Tab. 2 Chemické složení materiálu EN AW-6060.

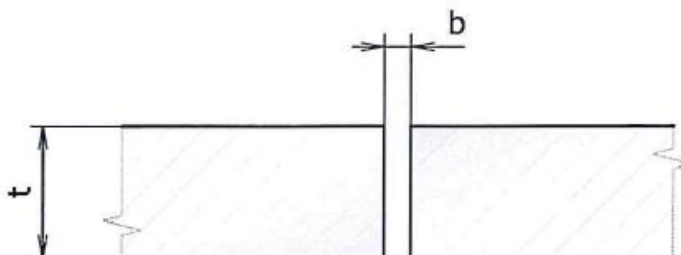
Chemické složení: hmotnostní podíl [%] - dle ČSN EN 573[26]									
EN AW-6060	Si[%]	Fe[%]	Cu[%]	Mn[%]	Mg[%]	Cr[%]	Ni[%]	Zn[%]	Ti[%]
min.	0,3	0,1			0,35				
max.	6	0,3	0,1	0,1	0,6	0,05		0,15	0,1

Dále pomocí zkoušky tahem za pokojové teploty dle normy ČSN EN ISO 6892-1 [27] byly zjištěny následující základní materiálové charakteristiky:

Tab. 3 Materiálové charakteristiky EN AW-6060.

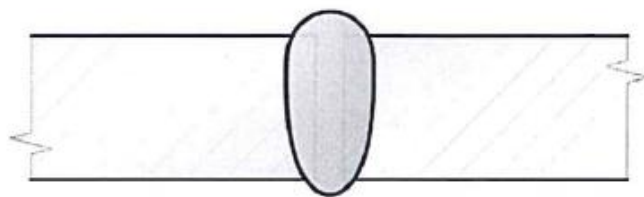
Zkouška tahem – dle ČSN EN ISO 6892-1[27]			
	Rp0.2[MPa]	Rm[MPa]	A ₅ [%]
min.	160	215	8
max.			

Zkušební kus byl svařen dle normy ČSN EN ISO 15614-2 [28]. Spoj byl připraven podle předběžné specifikace postupu svařování(dále jen pWPS). Spojované součásti měly tloušťku 3 mm, geometrie spoje je vyobrazena na obrázku č.15, součásti byly svařovány v obou případech v poloze PA podle normy ČSN EN ISO 6947 [29].



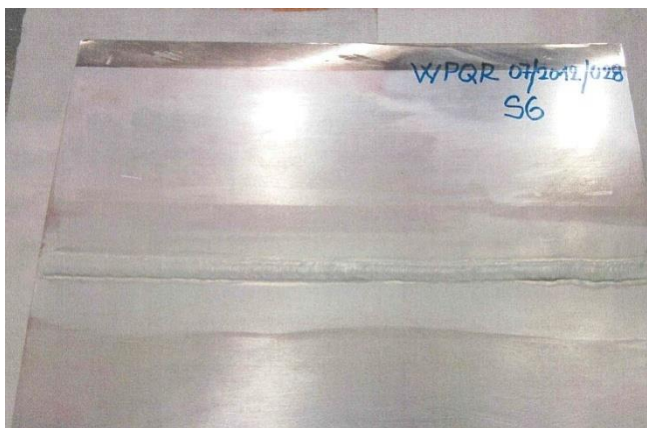
Obr. 15 Geometrie svaru

Typ svaru je tupý v obou případech. Lze ho vidět na obrázku č.16.



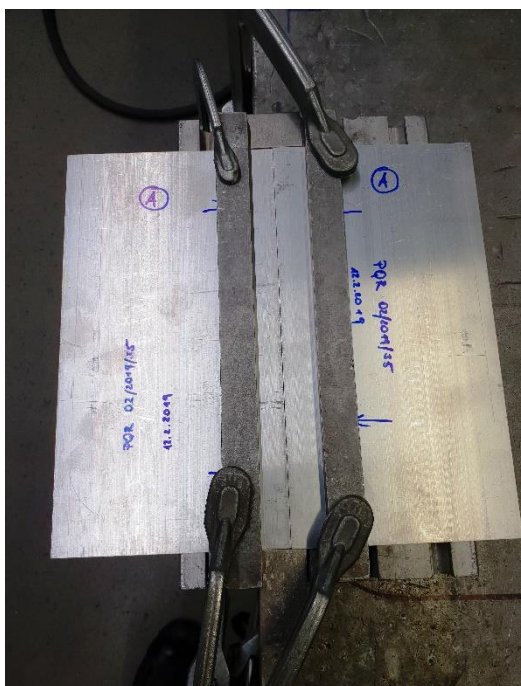
Obr. 16 Tupý svar

Na obrázku č. 17 lze vidět řez svaru starého vzorku svařovaného v roce 2012.



Obr. 17 Vzhled svaru starého vzorku z roku 2012

Upínání vzorku lze vidět na obrázku č.18



Obr. 18 Upínání svařovacího vzorku před svařováním



Obr. 19 Svářečka na které probíhalo svařování nového vzorku v roce 2019

5.2 Parametry svařování

Vzorky byly svařovány metodou 131 (MIG) pomocí impulzního proudu, který měl hodnotu 70 A. Při obou svařováních byly hodnoty základního i impulzního proudu stejné. Stejně tak bylo v obou případech stejné napětí $U=15,5$ V a rychlost svařování 40 cm/min. Jako ochranný plyn byla zvolena směs argonu a hélia, plyn nese označení I3-ArHe-30. Průtok plynu byl stejný v obou případech a to $l=14$ l/min. Všechny parametry lze vidět v tabulce č. 4.

Tab. 4 Porovnání starého a nového svařování.

Svařování		
Datum	Staré	Nové
Místo	IFE-CR Modřice	IFE-CR Modřice
Číslo pWPS	2007117	0402128
Metoda	131	131
Způsob čištění a přípravy	Mechanické opracování	Mechanické opracování
Materiál	AW 6060	AW 6060
Tloušťka materiálu [mm]	3	3
Poloha svařování	PA	PA
Typ svaru	Tupý	Tupý
Způsob svařování	131	131
Přídavný materiál	S Al 5356	S Al 5087
Průměr přídavného materiálu[mm]	1,2	1,2
Základní proud[A]	100	100
Impulsní proud [A]	70	70
Napětí [V]	15,5	15,5
Rychlost svařování [cm/min]	40	40
Ochranný plyn	I3-ArHe-30	I3-ArHe-30
Transfer materiálu	Impulzní oblouk	Impulzní oblouk



Obr. 20 Svařování nového vzorku

5.3 Přídavný materiál [30].

Při svařování starého vzorku použit materiál S Al 5356, obchodním názvem Union AlMg5 a při svařování nového vzorku byl použit S Al 5087, obchodním názvem Union AlMg4,5MnZr. Materiály nesou označení dle normy ČSN EN ISO 18273 [30]. Základní materiálové charakteristiky přídavných materiálů jsou v tabulce č. 5.

Tab. 5 Materiálové charakteristiky přídavných materiálů.

Přídavné materiály - EN ISO 18273				
	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A5[%]	Průměr [mm]
S Al 5356	230	110	18	1,2
S Al 5087	275	125	16	1,2

5.4 Zkoušení vzorků a porovnání výsledků [28]

Zkoušky proběhly podle předepsaných norem. Seznam zkoušek potřebných k testování svarů je v normě ČSN EN ISO 15614-2 2006 [28].

Vizuální zkouška: Vizuální zkouška proběhla ve firmě IFE a byla provedena na 100% spoje. Spoj starého a nového vzorku **vyhověl požadavkům** normy EN ISO 10042 B.

Kapilární zkouška: Při kapilárních zkouškách starého i nového vzorku byl testován celý svar na vnějším povrchu. Vnější povrch byl v obou případech kartáčovaný. Penetrant byl nanesen na svar a 10 minut nechán působit po této době byl svar testován a v obou případech **svar vyhověl**.

Radiografická zkouška: Radiografická zkouška je předepsána dle normy ČSN EN ISO 15614-2 2006 [28] a samotná zkouška probíhala podle ISO 17636. Obě zkoušení jak v roce 2012 (staré) tak i v roce 2019 (nové) **vyhověly požadavkům**.

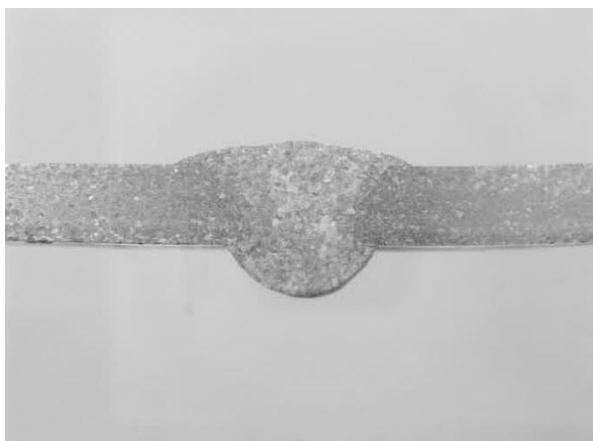
Tab. 6 Srovnání radiografických zkoušek.

	Starý vzorek	Nový vzorek
Přístroj	Smart 200 E	Smart 200 E
Napětí [kV]	100	50
Proud [mA]	4	2
Tloušťka [mm]	3	3
Exp. Čas [s]	120	58
Vel. Ohniska [mm]	1,28	1,28
Rozměr Filmu	10x40	10x40
Výsledek	Vyhovuje	Vyhovuje

Zkouška makrostruktury: Zkouška byla provedena dle normy ISO 17639 v souladu předpisy dle normy ČSN EN ISO 15614-2 2006 [28]. **V makrostruktuře obou vzorku nebyly zjištěny vady typu trhlin, dutin, vměstků, neprůvaru a studeného spoje.** Makrostruktura starého svaru lze vidět na obrázku č.21. V tabulce č. 7 jsou tyto výsledky rozebrány.

Tab. 7 Srovnání výsledků makroskopických zkoušek.

	Starý vzorek		Nový vzorek	
Název vady	max.	Naměřená	max.	Naměřená
Nadměrné převýšení tupého svaru	2,4	0,8	2,8	1
Nadměrné převýšení kořene	3	2,9	4	2
Rovnoměrné pórovitost	≤1%	≤0,5%	≤1%	0



Obr. 21 Makrostruktura starého svaru

Zkouška mikrostruktury: Zkouška byla provedena dle normy ISO 17639 v souladu předpisy dle normy ČSN EN ISO 15614-2 2006 [28].

Základní materiál: Starý vzorek – Mikrostruktura je tvořena fází α , což je v našem případě hliník, a částicemi Mg_2Si lze vidět na obrázku č. 22.

Nový vzorek – Struktura je tvořena fází α obsahující rovnoměrně vyloučené částice intermetalických fází tvořených Mg, Fe, Mn a Si velikostí do $10\mu m$. Toto lze vidět na obrázku č.23.



Obr. 22 Mikrostruktura základního materiálu – starý vzorek



Obr. 23 Mikrostruktura základního materiálu – nový vzorek

Tepelně ovlivněná oblast: Starý vzorek - Mikrostrukturu tepelně ovlivněné oblasti lze vidět na obrázku č. 24.

Nový vzorek - Obrázek č. 25 nám ukazuje mikrostrukturu tepelně ovlivněné oblasti ze svařování z roku 2019.



Obr. 24 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti – starý vzorek



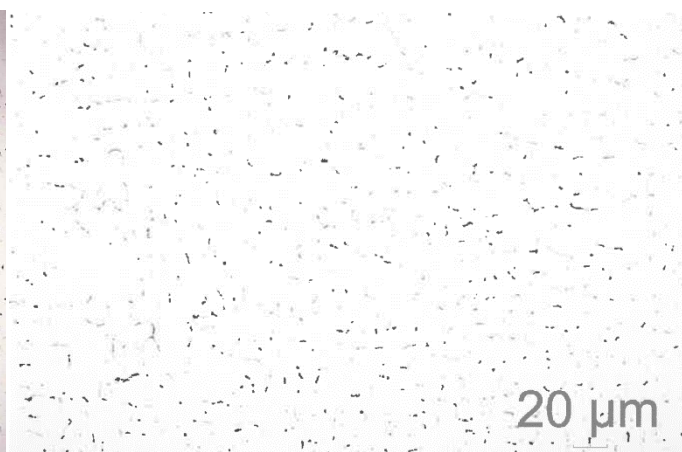
Obr. 25 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti – nový vzorek

Svar : Starý vzorek - Mikrostruktura je tvořena dendrity fáze α a částicemi obsahující Mg a Si. Obrázek č. 27

Nový vzorek-Obrázek č.26 nám ukazuje mikrostrukturu svaru nového vzorku. Matrice je tvořena fází α obsahující rovnoměrně vyloučené částice tvořené Mn, Mg, Fe a Si.



Obr. 27 Mikrostruktura svaru starého vzorku



Obr. 26 Mikrostruktura svaru nového vzorku

Výsledek: Závěrem u obou testování nebyly v základním materiálu, tepelně ovlivněné oblasti ani ve svaru, zjištěny **žádné mikrotrhliny**. Obě zkoušky tudíž **vyhověly požadavkům**.

Zkouška lámavosti – Ohybová zkouška: Testování je předepsáno dle normy ČSN EN ISO 15614-2 2006 [28]. Vzorky byly celkem čtyři pro každé zkoušení. Všechny vzorky v obou testováních **vyhověly požadavkům**. Parametry a podmínky zkoušení lze vidět v tabulce č.8.

Tab. 8 Porovnání vzorků ze zkoušek lámavosti.

	Rozměr a x b [mm]	Průměr ohybového trnu [mm]	Vzdálenost podpor [mm]	Úhel ohybu [°]	Teplota [°C]	Výsledek
Starý vzorek	20 x 3	35	44	180	25	Bez vad
Nový vzorek	40 x 3	33	42	180	20	Bez vad

Zkouška tahem za pokojové teploty: Zkoušení proběhlo podle normy ISO 4136. Vzorky pro každé zkoušení byly dva. K vyhovění zkoušky musí oba vzorky překročit minimální přípustnou hodnotu. Tahové zkoušky proběhly dvě. První proběhla na starém vzorku z roku 2012. Druhé testování proběhlo na novém vzorku, v roce 2019, přičemž se svařovalo jiným přídavným materiálem. V tabulce č.10 lze vidět souhrn a srovnání tahových zkoušek. Dle tabulky č. 2 v kapitole 7.4.2 v normě ČSN EN ISO 15614-2 2006 [28], tato tabulka má v této bakalářské práci označení č. 9, byla stanovena přípustná minimální hodnota na 129 MPa. V tabulce č. 9 lze vidět stanovení součinitele využití spoje T a výpočet minimální meze pevnosti svaru pro vyhovění svaru.

Tab. 9 Stanovení součinitele využití spoje a výpočet minimální přípustné hodnoty svaru.[28]

Materiál	Stav základního materiálu před svařováním	Stav po svařování	$T = \frac{R_m(w)}{R_m(pm)}$
23.1	T5 a T6	Přirozené stárnutí	0,6
	T5 a T6	Umělé stárnutí	0,7
$Minimální\ pevnost\ svaru = R_m \cdot 0,6 = 129\ MPa$			

Tab. 10 Porovnání tahových zkoušek.

Starý vzorek	Síla na mezi pevnosti F_m [N]	Pevnost v tahu R_m [MPa]
Č.1	9400	121,8
Č.2	9300	120
Nový vzorek		
Č.1	9343	124
Č.2	9267	128,6

Protokoly o tahových zkouškách starého i nového vzorku jsou v přílohách B respektive C. Výsledkem tedy je, že tahové zkoušky starého ani nového vzorku **nevyhověly požadované minimální hodnotě**.

5.5 Výsledky tahové zkoušky po stárnutí

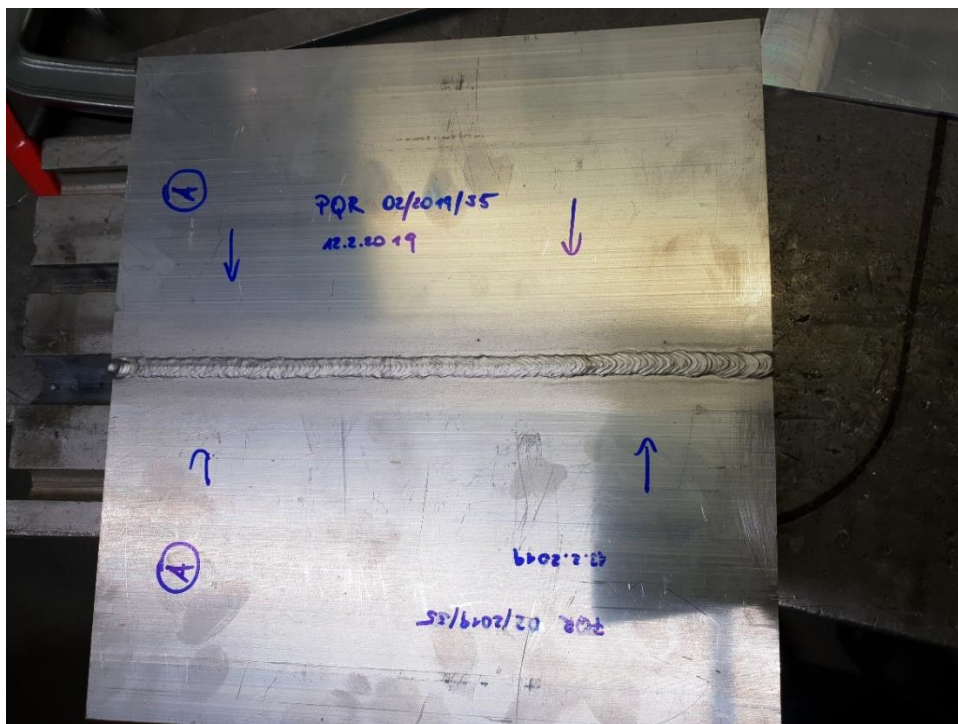
Po svařování byl vzorek ponechán přirozenému stárnutí. Protokol o tahové zkoušce po vystárnutí je v příloze D. Výsledky takové zkoušky po stárnutí jsou v tabulce č.11.

Tab. 11 Výsledky tahové zkoušky po stárnutí.

Zkoušení 2019 vzorku z roku 2012 (po vytvrzení)	Síla na mezi pevnosti F_m [N]	Pevnost v tahu [MPa]
Vzorek 1	10447	144,4
Vzorek 2	10962	143,5

5.6 Vyhodnocení zkoušek

Pro kvalifikaci dle normy ČSN EN ISO 15614-2 2006 [28] musí všechny zkoušky předepsané touto normou vyhovět. Všechny zkoušky vyhověly až na zkoušku tahem. Při svařování materiálu se pevnost v tahu snížila pod minimální hodnotu předepsanou v normě ČSN EN ISO 15614-2 2006 [28]. Ovšem orientační tahové zkoušky na materiálu po vystárnutí jsou vyhovující. Pro kvalifikaci postupu dle normy ČSN EN ISO 15614-2 2006 [28] je tedy nutné materiál zpevnit stárnutím nebo tepelných zpracováním.



Obr. 28 Hotový svar

6 KVALIFIKACE POSTUPU SVAŘOVÁNÍ VZORKU [28], [29], [30], [31]

V předchozí kapitole nevyhověly tahové zkoušky dle ČSN EN ISO 15614-2 2006 [28], tudíž po konzultaci s firmou IFE, bylo rozhodnuto provést kvalifikaci postupu svařování dle normy ČSN EN ISO 15613 2005 [31]. V následující kapitole jsou uvedeny rozdíly oproti normě ČSN EN ISO 15614-2 2006 [28] a výsledky kvalifikace postupu dle ČSN EN ISO 15613 2005 [31].

6.1 Požadavky normy EN ISO 15613

Kvalifikace postupu svařování musí být provedena příslušným zkušebním orgánem podle normy ČSN EN ISO 15614 [28], dle požadavků normy ČSN EN ISO 15613 2005 [30]. Svařování musí probíhat za výrobních podmínek.

6.1.1 Zkoušení dle normy EN ISO 15613

Zkoušení zkušebních vzorků musí být provedeno dle normy ČSN EN ISO 15614 [28]. Obecně jsou požadovány následující zkoušky

Vizuální zkouška: Vizuální zkouška byla popsána v kapitole č.5.

Kapilární zkouška: Kapilární zkouška byla popsána v kapitole č.5.

Zkouška tvrdosti: Zkouška tvrdosti probíhá dle normy ČSN EN 755-2.

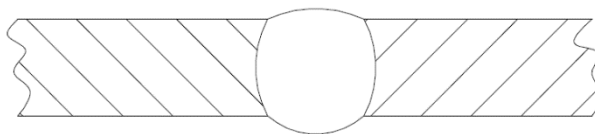
Zkouška makrostruktury: Zkouška makrostruktury byla popsána v kapitole č.5.

6.1.2 Zásady kvalifikace

Kvalifikace je pouze pro jeden konkrétní spoj, který byl použit pro svařování. Kvalifikovat postup je možné pouze tehdy, pokud všechny zkoušky v normě vyhověly. Poté může zkušební orgán potvrdit a datovat kvalifikaci postupu svařování.

6.2 Kvalifikovaný postup svařování pro EN AW 6060 dle ČSN EN ISO 15613 [29], [30]

Svařování by mělo proběhnout na materiálu EN AW 6060 metodou 141. Svařované materiály mají tloušťku 3 mm. Poloha pro svařování PA podle normy ČSN EN ISO 6947 [29], jedná se o tupý svar. Rozkryv svaru je přímočará housenka. Polohu svaru lze vidět na obrázku č. 29.



Obr. 29 Svar pro svařování

Shrnutí podmínek svařování je v tabulce č.12

Tab. 12 Detaily svařování.

Detaily pro svařování	
Metoda	141
Průměr přídavného materiálu [mm]	2,4
Proud [A]	180
Impulsní proud [A]	160
Napětí [V]	14,5
Rychlost svařování [cm/min]	25
Ochranný plyn	I3-ArHe-30

Přídavný materiál je od výrobce Böhler nese označení S AL 5087 (název značky Union AlMg4,5MnZr). Mechanické vlastnosti lze vidět v tabulce č. 13.

Tab. 13 Mechanické vlastnosti S AL 5087.

Přídavné materiály - EN ISO 18273			
	Rm [MPa]	Rp0,2 [MPa]	A5[%]
S Al 5087	280	130	30

Ochranný plyn od výrobce Linde gas pod značením I3-ArHe-30 (název značky VARIGON He30). Jedná se o směs hélia a argonu v poměru 30:70.

Typ wolframové elektrody je WC20 s průměrem 2,4 mm.

Celá pWPS je v příloze A.

ZÁVĚR

Svařování vzorku pro praktickou část proběhlo ve firmě IFE. Nové svařování v roce 2019 bylo za velmi podobných podmínek jako svařování v roce 2012, kdy svar nevyhověl tahové zkoušce. Nyní se ovšem svařovalo s přídavným materiálem o vyšší pevnosti v tahu. I přesto se v praktické části nepodařilo kvalifikovat postup svařování dle normy ČSN EN ISO 15614-2, protože tahové zkoušky svařené součásti opět nepřekročili minimální povolenou mez i přesto že byl použit přídavný materiál s vyšší mezí pevnosti než při prvním svařování v roce 2012. Výsledkem tedy je, že přídavný materiál má minimální vliv na konečnou pevnost svaru. Po konzultaci s firmou IFE bylo rozhodnuto udělat předběžný postup kvalifikace dle normy ČSN EN ISO 15613. V práci proběhl rozbor této normy a byly zvýrazněny rozdíly oproti normě ČSN EN ISO 15614-2. Byly také provedeny orientační zkoušky na materiálu po přirozeném stárnutí. Tyto zkoušky podle očekávání vyhověly požadavkům normy ČSN EN ISO 15614-2. Doporučení pro kvalifikaci dle normy ČSN EN ISO 15614-2 tedy je nechat vzorky po svařování vystárnout nebo je tepelně zpracovat. Dále změna metody svařování, popřípadě upravení svařovacích parametrů.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] IFE. *IFE - CR* [online]. 2018 [cit. 2018-11-26]. Dostupné z: http://www.ife.cz/cz/company/company_1/company.jsp
2. In: *IFE-CR* [online]. 2018 [cit. 2018-11-27]. Dostupné z: http://www.ife-doors.com/en/company/company_1/company.jsp
3. *IFE-produkty* [online]. 2018 [cit. 2018-11-27]. Dostupné z: http://www.ife.cz/cz/products/products_1/products_1.jsp
4. ROUČKA CSC, Doc.Ing. Jaromír. *Metalurgie neželezných slitin*. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o. Brno, 2004, s. 4-6. ISBN 80-214-2790-6.
5. KOUTNÝ, Ing. Jiří. *Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování. Hliníkové materiály a možnosti jejich svařování*. 3. 2006.
6. ALINVEST [online]. 2017 [cit. 2018-11-28]. Dostupné z: <https://www.alinvest.cz/hlinik/historie-hliniku>
7. ALINVEST. *ALINVEST* [online]. 2017 [cit. 2018-12-03]. Dostupné z: <https://www.alinvest.cz/cs/hlinik/vyroba-hliniku>
8. GROUP, PECHINEY. *Aluminium semi-finished products*. Bolougne. 1997.
9. ČVUT fakulta strojní [online]. [cit. 2019-01-07]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf
10. *Technologie svařování a zařízení*. Ostrava: ZEROSS, 2001. ISBN 80-85771-81-0.
11. ČESKÁ SVÁŘEČSKÁ SPOLEČNOST ANB [online]. Ing. Vladislav Kolář, 2015 [cit. 2019-01-09]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=502>
12. HAJDÍK, Ing. Jiří a Ing. Michal HEINRICH. *Technologie svařování hliníku a jeho slitin*. Ostrava: Český svářečský ústav.
13. ČSN EN ISO 14175. *Svařovací materiály - Plyny a jejich směsi pro tavné svařování a příbuzné procesy*. 2009.
14. *Střední průmyslová škola Kroměříž* [online]. [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <https://coptkm.cz/portal/reposit.php?action=0&id=33447&instance=2>

15. *Konstrukce* [online]. Ing. Jaroslav Hájek, 2014 [cit. 2019-01-14]. Dostupné z: <http://www.konstrukce.cz/clanek/hlinik-a-moznosti-jeho-svarovani/>
16. MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014. ISBN 978-80-01-05527-4.
17. MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Prešov: Adin, 2005. ISBN 80-89041-88-4.
18. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu I*. Brno: CERM, 2001, 505 s. ISBN 80-720-4193- 2.
19. *DK styl - Ing. Vladimír Kruliš* [online]. 2019 [cit. 2019-01-26]. Dostupné z: <http://www.dkstyl.com/svareni-laserem.php>
20. *Schinkmann* [online]. [cit. 2019-01-26]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/odporove-svarovani>
21. *Magazín Automig* [online]. [cit. 2019-01-26]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/obalena-elektroda-mma/>
22. *Magazín Automig* [online]. [cit. 2019-01-26]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/tig-wig-plasmatig/>
23. *Magazín Automig* [online]. [cit. 2019-01-26]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/obalena-elektroda-mma/>
24. TKANÝ, J. *Svařování rozměrných hliníkových svařenců*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 32 s. Vedoucí bakalářské práce doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc
25. *Alfain - katalog hořáků* [online]. [cit. 2019-02-11]. Dostupné z: <https://www.alfain.eu/static/user/uploads/stahuj/katalog-parker.68wka.pdf>
26. ČSN EN 573. *Hliník a slitiny hliníku. Chemické složení a druhy tvářených výrobků*. 2014.
27. ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. 2017.
28. ČSN EN ISO 15614-2. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Zkouška postupu svařování - Část 2: Obloukové svařování hliníku a jeho slitin*. 2006.
29. ČSN EN ISO 6947. *Svařování a příbuzné procesy - Polohy svařování*. 2011.
30. ČSN EN ISO 18273. *Svařovací materiály - Svařovací dráty a tyče pro svařování hliníku a slitin hliníku - Klasifikace*. 2016

31. ČSN EN ISO 15613. *Stanovení a kvalifikace postupů svařování kovových materiálů - Kvalifikace na základě předvýrobní zkoušky svařování.* 2005.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
d	Délka	[m]
F	Síla	[N]
I	Proud	[A]
m	Hmotnost	[Kg]
P	Tlak	[Pa]
T	Teplota	[°C]
U	Napětí	[V]
L ₀	Počáteční délka	[m]
L	Délka po přetvoření	[m]
ε	poměrné přetvoření	[-]
σ	Smluvní napětí	[MPa]
R _{p0,2}	Mez kluzu	[MPa]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
A ₅	Kontrakce	[-]
Λ	Tepelná vodivost	[W/m.K]
pWPS	Předběžný postup svařování	
WPS	Postup svařování	
WPQR	Kvalifikovaný postup svařování	
NDT	Nedestruktivní zkoušení	

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Sídlo společnosti v rakouském Kematenu [2]	12
Obr. 2 Pracovní diagram [14]: : a) s výraznou mezí kluzu, b) s nevýraznou mezí kluzu	17
Obr. 3 Smluvní diagram napětí - deformace[16]	18
Obr. 4 Různé materiály v tahovém diagramu[14].....	19
Obr. 5 Vliv ohřevu na tvrdost a pevnost stanovenou při pokojové teplotě u slitiny G-AlSi10Mg, která stárnula před ohřevem uměle[15].	20
Obr. 6 Pevnost při creepu v závislosti na čase do lomu pro různé teploty pro slitinu AlZn ₆ MgCu po umělém stárnutí.....	21
Obr. 7 Umístění zkušebních vzorků pro tupý spoj na plechu [26].....	23
Obr. 8 Schéma svařování metodou 131[21].....	26
Obr. 9 Svařovací hořák chlazený plynem pro svařování metodou 131[25].....	27
Obr. 10 Schéma svařování metodou 141[22].....	28
Obr. 11 Hořáky pro svařování metodou 141[10]	29
Obr. 12 Vliv ochranného plynu na průřez svaru[24]	29
Obr. 13 Schéma svařování metodou 111[23].....	31
Obr. 14 Schéma odporového svařování[20].....	32
Obr. 15 Geometrie svaru	35
Obr. 16 Tupý svar	36
Obr. 17 Vzhled svaru starého vzorku z roku 2012.....	36
Obr. 18 Upínání svařovacího vzorku před svařováním	36
Obr. 19 Svářečka na které probíhalo svařování nového vzorku v roce 2019	37
Obr. 20 Svařování nového vzorku	39
Obr. 21 Makrostruktura starého svaru	41
Obr. 22 Mikrostruktura základního materiálu – starý vzorek	41
Obr. 23 Mikrostruktura základního materiálu – nový vzorek.....	41
Obr. 24 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti – starý vzorek.....	42
Obr. 25 Mikrostruktura tepelně ovlivněné oblasti – nový vzorek	42
Obr. 26 Mikrostruktura svaru nového vzorku.....	42
Obr. 27 Mikrostruktura svaru starého vzorku	42
Obr. 28 Hotový svar	44
Obr. 29 Svar pro svařování	46

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Požadované zkoušky pro tupý svar na plechu. [26].....	22
Tab. 2 Chemické složení materiálu EN AW-6060.....	35
Tab. 3 Materiálové charakteristiky EN AW-6060.	35
Tab. 4 Porovnání starého a nového svařování.	38
Tab. 5 Materiálové charakteristiky přídatných materiálů.	39
Tab. 6 Srovnání radiografických zkoušek.....	40
Tab. 7 Srovnání výsledků makroskopických zkoušek.	40
Tab. 8 Porovnání vzorků ze zkoušek lámavosti.....	43
Tab. 9 Stanovení součinitele využití spoje a výpočet minimální přípustné hodnoty svaru.[28]	43
Tab. 10 Porovnání tahových zkoušek.	43
Tab. 11 Výsledky tahové zkoušky po stárnutí.	44
Tab. 12 Detaily svařování.	46
Tab. 13 Mechanické vlastnosti S AL 5087.	46

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A. Předběžný postup svařování pWPS

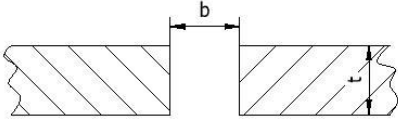
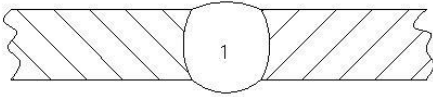
Příloha B. Výsledky tahových zkoušek ze svařování starého vzorku z roku 2012

Příloha C. Výsledky tahových zkoušek ze svařování nového vzorku z roku 2019

Příloha D. Výsledky tahových zkoušek po výstárnutí

	Pokyny pro svařování (WPS)	Číslo WPS: 24042019	Rev. 0
	3BW/141/AW6060/3	Strana 1 od 1	

Místo: IFE CR a.s.	Zkoušející nebo zkušebna: Janík Martin
Číslo WPQR: ENISO9606-2	Způsob přípravy a čištění: mechan. opracování
Kvalifikace svářeče: (WIG)	Opracování kofenové vrstvy: žádný
Svařovací proces: Tupý svar	Specifikace základního materiálu: Č. skupiny ISO TR 15608:
Druh svaru: IFE CR a.s.	1) [AW-6060 (3.3206)] AW-AlMgSi 23.1
Zákazník: 141	2) [AW-6060 (3.3206)] AW-AlMgSi 23.1
Číslo zakázky: 141	Tloušťka materiálu: 3 mm
Číslo výkresu:	Vnější průměr: PA
Číslo dílu:	Poloha svařování: PA

Rozměry: b - 0-2 mm t - 3 mm	Geometrie spoje 	Postup svařování 
	©hsk • welding solutions	©hsk • welding solutions

Poznámka::

Detaily pro svařování									
	Vrstva svaru	Proces	Ø přídavného materiálu [mm]	Proud	Napětí [V]	Druh proudu / polarita	Rychlost podávání drátu	Rychlost svařování [cm/min]	Vložená energie [kJ/cm]
A)	Nová vrstva	141	2,4	Základ Impuls	180 A 160 A	14,5	~	25	3,55

Přídavný materiál / svařovací prášek					Zvláštní předpisy pro sušení	
Označení	Název značky	Výrobce	Čas [h]	Teplota [°C]		
A) S Al 5087 (AlMg4,5MnZr)	Union AlMg4,5MnZr	Böhler				

Ochranný plyn						
Typ	Název značky	Výrobce	Průtok [l/min]	Doba předfuku [s]	Doba dofuku [s]	
A) Svařování: I3 - ArHe-30	VARIGON He30	Linde Gas	13-15	1	3	

Další informace		Rozkvyk: Přímochará housenka	
Parametry / hodnota		Teplota předehřátí [°C]:	Mezivrstvová teplota [°C]:
A) Typ wolframové elektrody: WC 20			
Ø wolframové elektrody: 2,4 mm			

Poznámka:		
Hodnoty svařování upravovat ruční pulzací na hořáku. Překročení hranice základního proudu je nepřipustné.		
Datum / vyhotovil: 24.4.2019 Janík Martin	Datum / zkontroloval: 24.4.2019 Janík Martin	Datum / schválil: 24.4.2019 Janík Martin
Podpis	Podpis	Podpis

Protokol o zkoušce
Mechanické zkoušení

Prüfprotokoll
Mechanische Prüfungen



Protokol č. - Protokoll-Nr. - Report No.:											266-2/2019		Strana: 4/5	Typ zkušebního vzorku	opravená bearbeitet																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																											
Označení Bezeichnung Spezifikation	Tavba č. Schweiß-Nr. Heat No.	Rozměry zkušebního vzorku Probenabmessung Dim. of specimen								Seite: Page:	4/5	Type of tested sample:	machined bar																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
		Před přetržením vor dem Bruch Before pulling - apart		Po přetržení nach dem Bruch After pulling - apart		Poloha vzorku Probenlage Position	Teplota zkoušek Prüftemperatur Test Temperature	Zatížení na mezi kluzu Belastung an der Streckgrenze Load at yielding	Zatížení na mezi pevnosti Höchstzugkraft Load at strength																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
		d_o	$b_o \times a_o$	S_o																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		d_u	$b_u \times a_u$	S_u																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		L_o	L_u																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
266-2		mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	

Protokol o zkoušce Mechanické zkoušení

Prüfprotokoll Mechanische Prüfungen



Protokol č. - Protokol-Nr. - Report No.:													266-1/2019		Strana: Seite: Page:		3/4		Typ zkoušebního vzorku Probenart: Type of tested sample:		opracovaná bearbeitet machined bar																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																							
Označení Bezeichnung Specification	Tavba č. Schmelze Nr. Heat No.	Rozměry zkoušebního vzorku Probendimensioning Dim. of specimen										Zatížení na mezi kluzu Belastung an der Streckgrenze Load at yielding		Zatížení na mezi pevnosti Höchstzugkraft Load at strength		Mez kluzu Streckgrenze Yield strength		Pevnost v tahu Zugfestigkeit Tensile strength		Zúžení Einschnürung Reduction		Tažnost Dehnung Elongation		Poznámka Bemerkung Note																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																				
		Před přetržením vor dem Bruch Before pulling - apart		Po přetržení nach dem Bruch After pulling - apart		Před přetržením vor dem Bruch Before pulling-apart		Po přetržení Nach dem Bruch After pulling-apart		Poloha vzorku Probenlage Position																Teplota zkoušek Prüftemperatur Test Temperature																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																		
		d_0		$b_0 \times a_0$		S_0																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		d_u		$b_u \times a_u$		S_u																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																						
		mm		mm		mm		mm		mm																mm		°C																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																
266-1																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																												